



Gestão de projeto e produção de uma ponte ferroviária em estrutura metálica

RAFAEL TIAGO FERRAZ DE AZEVEDO

novembro de 2019

GESTÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE UMA PONTE FERROVIÁRIA EM ESTRUTURA METÁLICA

Rafael Tiago Ferraz de Azevedo

1140520

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

GESTÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE UMA PONTE FERROVIÁRIA EM ESTRUTURA METÁLICA

Rafael Tiago Ferraz de Azevedo

1140520

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Paulo Manuel Salgado Tavares de Castro

Professor Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostava de deixar o meu sincero agradecimento à empresa Metalongo – Metalúrgica de Valongo, SA por me ter recebido da melhor forma possível durante todo o período de estágio. A todos os seus colaboradores, principalmente do departamento técnico pela disponibilidade e apoio prestado e em particular ao Eng.º Pedro Bastos, orientador de estágio, por me ter dado esta oportunidade.

Ao orientador do ISEP, Doutor Raul Campilho, pela disponibilidade demonstrada e pelo excelente acompanhamento que faz aos alunos.

Aos meus amigos e companheiros de curso, pelos excelentes momentos que passamos juntos nas horas de estudo e convívio.

E por último, à minha família, pelo apoio e coragem que sempre me transmitiram durante todo o meu percurso escolar e que me permitiu chegar até este ponto.

Um muito obrigado a todos.

PALAVRAS CHAVE

Planeamento de fabrico; controlo de qualidade; processos de fabrico; estrutura metálica.

RESUMO

A gestão de projeto é, atualmente, uma forma muito eficaz de organizar todas as etapas necessárias à realização de um trabalho orientado para os melhores resultados possíveis. Uma das etapas que pode ser considerada parte integrante da gestão de projeto é a gestão de produção, que gere os recursos iniciais de uma empresa transformando-os em produtos e/ou serviços de valor acrescentado. Hoje em dia, são cada vez mais procurados produtos ou serviços com o melhor rácio entre o preço e a qualidade. Esta procura constante obriga a que as empresas adaptem ou encontrem novas soluções para as suas estratégias de gestão de projeto, de forma a tornar a sua produção cada vez mais eficiente sem esquecer o fator da qualidade.

O trabalho desenvolvido pretende assegurar a gestão do projeto e de produção de uma ponte ferroviária em estrutura metálica. Para isso, foram estabelecidos alguns pontos que deveriam ser cumpridos, como por exemplo a realização de um plano de trabalhos que estabelece a ordem cronológica de execução de cada tarefa, a análise da estrutura em termos de fabrico para a posterior otimização, realização do modelo 3D para a obtenção dos desenhos de fabrico, realização do plano de fabrico de forma a organizar as operações no interior da oficina, assegurar o controlo de qualidade, estudar as rotas e os meios de transporte necessários e definir o plano de montagem da estrutura em obra.

O balanço final do trabalho desenvolvido permitiu perceber em que fases é necessária a intervenção para a correção de erros e possibilitar a melhoria dos processos desenvolvidos pela empresa em trabalhos futuros.

KEYWORDS

Manufacturing planning; Quality control; Manufacturing processes; Metal structure.

ABSTRACT

Project management is currently a very effective way of organizing all the necessary steps to perform a work oriented in the direction of the best possible results. One of the steps that can be considered an integral part of project management is production management, which manages the initial resources of a company transforming them into value added products and/or services. Nowadays, products or services are increasingly pursued with the best ratio between cost and quality. This constant demand requires companies to adapt or find new solutions to their project management strategies, in order to make their production increasingly efficient without forgetting the quality factor.

The developed work intends to ensure the project management and production of a railway bridge in metal structure. For this, some points that should be fulfilled were established, for example, the realization of a work plan that establishes the chronological order of execution of each task, the analysis of the structure in terms of manufacture for the subsequent optimization, realization of the 3D model to obtain the manufacturing drawings, realization of the manufacturing plan in order to organize the operations inside the workshop, ensure quality control, study the necessary routes and means of transport and define the plan of assembly of the structure in construction area.

The final balance of the developed work allowed to see in which phases it is necessary the intervention to correct errors and allow the improvement of the processes developed by the company in future works.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|-------------|---|
| AWS | <i>American Welding Society</i> |
| BIM | <i>Building Information Modeling</i> |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| ELS | Estado Limite Serviço |
| ELU | Estado Limite Último |
| FMEA | <i>Failure Mode Effect Analysis</i> |
| MAG | <i>Metal Active Gas</i> |
| MIG | <i>Metal Inert Gas</i> |
| NPR | Número de Prioridade de Risco |
| PIE | Plano de Inspeções e Ensaios |
| WPQR | <i>Welding Procedure Qualification Record</i> |
| WPS | <i>Welding Procedure Specification</i> |
| 3D | Três dimensões |

Lista de Unidades

| | |
|----------------------|----------------|
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| μm | Micrómetro |
| m² | Metro quadrado |

| | |
|------|---------------------|
| mm/m | Milímetro por metro |
| ton | Tonelada |
| kg | Quilograma |
| °C | Grau celsius |

Lista de Símbolos

| | |
|---|----------------|
| % | Porcentagem |
| ± | Mais ou menos |
| ≥ | Maior ou igual |
| < | Menor |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Tipos de estruturas metálicas [7-10] | 9 |
| Figura 2 – Forth Bridge (Edinburgh, Escócia) [12] | 10 |
| Figura 3 – Esquema da estrutura de uma ponte. A cinzento escuro está representada a subestrutura, os restantes elementos representam a superestrutura (adaptado de [14]) | 11 |
| Figura 4 – Ligação soldada de elementos metálicos (elaboração própria) | 12 |
| Figura 5 – Ligação aparafusada de elementos metálicos [19] | 14 |
| Figura 6 – Ligação rebitada de elementos metálicos [22] | 15 |
| Figura 7 – Ligação adesiva de elementos metálicos [25] | 16 |
| Figura 8 – Ligação do tipo <i>clinch</i> [27] | 16 |
| Figura 9 – Ligação rebitada com colagem entre elementos metálicos [29] | 17 |
| Figura 10 – Ponte 25 de Abril (Lisboa, Portugal) [32] | 19 |
| Figura 11 – Ponte Internacional do Guadiana (Vila Real St. António, Portugal) [33] | 19 |
| Figura 12 – Ponte D. Maria Pia (Porto, Portugal) [34] | 20 |
| Figura 13 – Ponte de Languedoc (Saint-André-de-Sangonis, França) [35] | 20 |
| Figura 14 – Ponte Taylor Southgate (Newport, USA) [36] | 21 |
| Figura 15 – Ponte Foyle (Londonderry, Irlanda do Norte) [39] | 22 |
| Figura 16 – Modelo de carga 71 [41] | 23 |
| Figura 17 – Propriedades disponíveis para os elementos (direita); Base de dados de relatórios (centro); Base de dados de ligações (esquerda) (elaboração própria) | 26 |
| Figura 18 – Esquema para elaboração de um plano de fabrico (elaboração própria) | 27 |
| Figura 19 – Exemplo de folha de gama operatória (adaptado de [56]) | 27 |
| Figura 20 – Exemplo de uma sequência de fabrico (adaptado de [56]) | 29 |
| Figura 21 – Esquema da tocha para o processo de oxicorte (adaptado de [65]) | 35 |
| Figura 22 – Esquema do processo de corte por plasma (adaptado de [66]) | 35 |
| Figura 23 – Esquema da tocha para o processo de corte por laser (adaptado de [65]) | 36 |
| Figura 24 – Esquema de soldadura por eléctrodo revestido (adaptado de [17]) | 37 |
| Figura 25 – Esquema de soldadura MIG-MAG [17] | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 26 – Esquema de soldadura por arco-submerso [17] | 39 |
| Figura 27 – Esquema de soldadura de pernos (adaptado de [67]) | 39 |
| Figura 28 – Processo de qualificação de uma WPS [78] | 43 |
| Figura 29 – Superfície decapada por jato abrasivo [86] | 46 |
| Figura 30 – Sistema geral de pintura (adaptado de [88]) | 47 |
| Figura 31 – Esquema do ensaio <i>pull-off</i> (adaptado de [89]) | 48 |
| Figura 32 – Aplicação do método de determinação da espessura de filme húmido [91] | 49 |
| Figura 33 – Aplicação do método de determinação da espessura de filme seco [93] | 49 |
| Figura 34 – Transporte rodoviário de mercadorias em contentores [98] | 51 |
| Figura 35 – Transporte ferroviário de mercadorias [99] | 52 |
| Figura 36 – Transporte aéreo de mercadorias [101] | 52 |
| Figura 37 – Transporte marítimo de mercadorias [102] | 53 |
| Figura 38 – Montagem por moldação no local [104] | 54 |
| Figura 39 – Montagem por segmentos [105] | 55 |
| Figura 40 – Montagem por levantamento [104] | 55 |
| Figura 41 – Montagem por lançamento incremental [105] | 56 |
| Figura 42 – Cofragem de pilar (esquerda); Ponte de Penacova sobre o rio Mondego (direita) (adaptado de [106]) | 59 |
| Figura 43 – Esquema 3D da estrutura da ponte | 60 |
| Figura 44 – Identificação dos elementos constituintes da estrutura | 61 |
| Figura 45 – Plano para a 1ª fase de trabalho (excerto do plano de trabalhos) | 64 |
| Figura 46 – Alteração da geometria das emendas entre vigas | 65 |
| Figura 47 – Alteração geométrica da junta de soldadura nos banzos | 66 |
| Figura 48 – Modificação do raio dos chanfros | 66 |
| Figura 49 – Marcação da contra-flecha na alma | 67 |
| Figura 50 – Marcação do posicionamento dos cutelos e cachorros | 67 |
| Figura 51 – Alteração geométrica de uma das chapas de ligação entre travamento e banzo inferior | 68 |
| Figura 52 – Alterações efetuadas ao tipo de junta de soldadura: A - Cordão de ligação das vigas nos topos da estrutura com os cachorros; B - Cordão de ligação das vigas das carlingas com os cachorros; C - Cordão de ligação entre as chapas que suportam os travamentos e o banzo inferior; D - Cordão vertical de ligação das chapas de topo da estrutura com os cachorros | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 53 – Olhal de elevação..... | 70 |
| Figura 54 – <i>Gabari</i> para posicionar a viga a 45° durante a soldadura por arco submerso..... | 70 |
| Figura 55 – Molde para marcação da posição dos conetores nas extremidades da viga | 71 |
| Figura 56 – Molde para posicionar chapas dos cachorros | 71 |
| Figura 57 – Molde para cortar a geometria da viga das carlingas..... | 71 |
| Figura 58 – 1ª fase da construção 3D da estrutura | 72 |
| Figura 59 – 2ª fase da construção 3D da estrutura | 73 |
| Figura 60 – 3ª fase da construção 3D da estrutura | 73 |
| Figura 61 – 4ª fase da construção 3D da estrutura | 74 |
| Figura 62 – 5ª fase da construção 3D da estrutura | 74 |
| Figura 63 – 6ª fase da construção 3D da estrutura | 75 |
| Figura 64 – Contra-flecha requerida entre os pilares A1-P1 e P2-A2..... | 75 |
| Figura 65 – Contra-flecha requerida entre os pilares P1-P2 | 76 |
| Figura 66 – 9ª fase da construção 3D da estrutura | 76 |
| Figura 67 – 10ª fase da construção 3D da estrutura | 77 |
| Figura 68 – Exemplos de pormenores de soldadura | 79 |
| Figura 69 – Sequência de fabrico da estrutura metálica da ponte..... | 83 |
| Figura 70 – Tabela resumo das operações de fabrico (excerto da folha de gama operatória)..... | 86 |
| Figura 71 – Excerto da lista de corte com algumas peças a obter na 1ª fase do processo | 87 |
| Figura 72 – Pormenor do corte de uma alma..... | 87 |
| Figura 73 – Exemplo de geometria realizada através de rebarbagem | 88 |
| Figura 74 – Cordão de soldadura após o procedimento de rebarbagem..... | 89 |
| Figura 75 – Chanfro num banzo | 89 |
| Figura 76 – Soldadura da emenda de uma viga..... | 92 |
| Figura 77 – Soldadura de conetores (Processo 783) | 92 |
| Figura 78 – Soldadura dos cachorros (Processo 138)..... | 92 |
| Figura 79 – Esquema de aplicação de pintura nas carlingas | 94 |
| Figura 80 – Esquema de aplicação de pintura nos travamentos..... | 94 |
| Figura 81 – Análise FMEA a etapas importantes ao fabrico..... | 96 |
| Figura 82 – Análise FMEA ao processo de soldadura desenvolvido em oficina | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 83 – Análise FMEA ao processo de corte desenvolvido em oficina..... | 98 |
| Figura 84 – Ensaio de partículas magnéticas numa viga | 101 |
| Figura 85 – Ensaio de partículas magnéticas numa carlinga | 101 |
| Figura 86 – Exemplo do acondicionamento de duas cargas | 107 |
| Figura 87 – Acondicionamento da carga | 109 |
| Figura 88 – Plano de trabalhos para a fase de montagem | 110 |
| Figura 89 – Exemplo de estruturas auxiliares necessárias: A- cavaletes; B - tendas..... | 111 |
| Figura 90 – Vista aérea da zona de montagem da estrutura da ponte | 111 |
| Figura 91 – Estruturas auxiliares fabricadas pela Metalongo: A – “nariz” de lançamento; B – Suporte para o sistema de elevação; C – Patim para fazer a estrutura deslizar; D – Guia lateral para a estrutura | 112 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Regulamentação utilizada para controlo de qualidade (adaptado de [5]) | 8 |
| Tabela 2 – Simbologia de atividades (adaptado de [56]) | 28 |
| Tabela 3 – Escala de avaliação do índice de gravidade (adaptado de [61]) | 31 |
| Tabela 4 – Escala de avaliação do índice de ocorrência (adaptado de [61]) | 32 |
| Tabela 5 – Escala de avaliação do índice de deteção (adaptado de [61]) | 33 |
| Tabela 6 – Normas a aplicar para o fabrico da estrutura | 62 |
| Tabela 7 – Alterações realizadas no projeto | 64 |
| Tabela 8 – Fases de criação do modelo 3D..... | 72 |
| Tabela 9 – Estudo da contração das vigas | 77 |
| Tabela 10 – Referências atribuídas a cada peça e conjunto..... | 78 |
| Tabela 11 – Lista de material a encomendar por fase..... | 80 |
| Tabela 12 – Legenda referente à sequência de fabrico da Figura 69..... | 83 |
| Tabela 13 – Procedimento de corte de perfis | 88 |
| Tabela 14 – Melhorias a aplicar nas WPS..... | 90 |
| Tabela 15 – Área de pintura dos conjuntos e peças para pintura..... | 95 |
| Tabela 16 – Tolerânciamento geométrico..... | 99 |
| Tabela 17 – Informação para a lista de expedição | 103 |
| Tabela 18 – Transportes realizados da Metalongo para a oficina de pintura | 105 |
| Tabela 19 – Descrição do transporte marítimo | 108 |
| Tabela 20 – Transportes realizados para o porto de Leixões. | 108 |

ÍNDICE

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 | Contextualização | 3 |
| 1.2 | Objetivos | 3 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação | 4 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 2.1 | Projeto de estruturas metálicas | 7 |
| 2.1.1 | Regulamentação utilizada | 7 |
| 2.1.2 | Tipos de estruturas..... | 9 |
| 2.1.3 | Materiais aplicáveis | 10 |
| 2.1.4 | Diferentes elementos construtivos | 10 |
| 2.1.5 | Ligações entre elementos metálicos | 12 |
| 2.1.5.1 | Ligações soldadas..... | 12 |
| 2.1.5.2 | Ligações aparafusadas | 13 |
| 2.1.5.3 | Ligações rebitadas..... | 14 |
| 2.1.5.4 | Outras ligações..... | 15 |
| 2.2 | Projeto de pontes | 17 |
| 2.2.1 | Particularidades no projeto de pontes | 17 |
| 2.2.2 | Tipos de geometrias utilizadas em pontes | 18 |
| 2.2.3 | Tipos de cargas | 23 |
| 2.2.4 | Método de cálculo..... | 23 |
| 2.3 | Gestão de projetos de grandes dimensões | 24 |
| 2.3.1 | Análise preliminar do projeto..... | 24 |
| 2.3.2 | Modelação 3D e desenhos técnicos | 25 |
| 2.3.3 | Planeamento de fabrico | 26 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.3.1 | Documentação necessária | 27 |
| 2.3.3.2 | Sequência de fabrico..... | 28 |
| 2.3.3.3 | Análise de riscos de processo – Failure Mode Effect Analysis (FMEA) | 29 |
| 2.3.4 | Processos de fabrico..... | 34 |
| 2.3.4.1 | Processos térmicos de corte e furação | 34 |
| 2.3.4.2 | Processos de soldadura | 36 |
| 2.3.4.3 | Tratamento anticorrosivo | 40 |
| 2.3.5 | Controlo de qualidade..... | 40 |
| 2.3.5.1 | Controlo dimensional..... | 41 |
| 2.3.5.2 | Controlo de soldadura | 42 |
| 2.3.5.3 | Controlo de pintura | 46 |
| 2.3.6 | Transporte de materiais e equipamentos | 50 |
| 2.3.7 | Montagem da estrutura | 53 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 59 |
| 3.1 | Apresentação da empresa | 59 |
| 3.2 | Caracterização da estrutura | 60 |
| 3.3 | Requisitos do projeto | 61 |
| 3.4 | Gestão do projeto | 63 |
| 3.4.1 | Plano de trabalhos..... | 63 |
| 3.4.2 | Análise e otimização do projeto | 64 |
| 3.4.3 | Modelação 3D e desenhos técnicos | 72 |
| 3.4.4 | Planeamento de fabrico | 80 |
| 3.4.4.1 | Encomenda de material | 80 |
| 3.4.4.2 | Sequência de fabrico..... | 82 |
| 3.4.4.3 | Folha de gama operatória..... | 85 |
| 3.4.4.4 | Folhas de operação | 86 |
| 3.4.4.5 | Análise FMEA | 96 |
| 3.4.5 | Controlo de qualidade..... | 98 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.4.5.1 | Controlo dimensional..... | 99 |
| 3.4.5.2 | Controlo de soldadura | 100 |
| 3.4.5.3 | Controlo de pintura | 101 |
| 3.4.6 | Transporte de materiais e equipamentos | 102 |
| 3.4.7 | Montagem da estrutura | 110 |
| 4 | CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 115 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO..... | 119 |
| 6 | ANEXOS..... | 129 |
| 6.1 | ANEXO 1 – Plano de trabalhos | 131 |
| 6.2 | ANEXO 2 – Desenhos do cliente | 133 |
| 6.3 | ANEXO 3 – Desenhos de fabrico | 135 |
| 6.4 | ANEXO 4 – Folha de gama operatória | 137 |
| 6.5 | ANEXO 5 – Folhas de operação | 139 |
| 6.6 | ANEXO 6 – Plano de inspeção e ensaios | 153 |
| 6.7 | ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade | 155 |
| 6.8 | ANEXO 8 – Listas de expedição de conjuntos, peças e equipamentos | 157 |

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A gestão de projeto é, segundo Carlos Oliveira [1], a forma mais atual de enfrentar a realização de um trabalho mantendo todas as suas etapas, desde o início até ao fim, sob um controlo absoluto e orientado para os melhores resultados possíveis. Pondo em prática a gestão de projeto, é possível ajustar os objetivos e métodos de uma empresa a cada projeto que por ela é desenvolvido. Além disto, a aplicação deste tipo de gestão, recorrendo a profissionais habilitados para o efeito pretendido, torna-se no caminho mais eficaz para o sucesso de cada projeto e da empresa que o desenvolve. A gestão de produção pode ser considerada uma das etapas que integra a gestão de projeto. É o processo que gere os recursos utilizados por uma empresa de forma a transformá-los em saídas valorizadas sob a forma de produtos e/ou serviços.

A incorreta aplicação deste tipo de gestão ou a sua inexistência poderá provocar situações que levam, por exemplo, ao mau aproveitamento da matéria-prima e, consequente, ao aumento dos custos devido aos erros cometidos. Todas as situações que ocorrem, quer estas sejam positivas ou negativas, afetam de alguma forma o consumidor final quer seja na qualidade do produto ou serviço, como no custo de aquisição. Cada vez mais os consumidores procuram produtos ou serviços com a melhor relação preço/qualidade e que vá ao encontro das suas necessidades. Isto permite que as empresas se vejam obrigadas a adaptarem-se e a encontrarem estratégias de gestão de projeto que acelerem a sua produção de forma eficiente, sem perder a qualidade esperada [2].

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido ao longo deste relatório surge após um estudo que demonstrou que o processo de manutenção, na ponte ferroviária existente sobre o rio Shire (Malawi), não seria a solução mais eficaz, tendo-se optado pela substituição da mesma.

Deste modo, procedeu-se à execução do fabrico da nova estrutura metálica para a ponte, tendo como objetivos os seguintes pontos:

- Realização e cumprimento do plano de trabalhos;

- Otimização da estrutura em termos de fabrico;
- Realização do modelo 3D e dos desenhos de fabrico;
- Realização do plano de fabrico:
 - Plano para a encomenda de material;
 - Definição da sequência de fabrico;
 - Especificação dos processos de fabrico;
- Garantia do controlo de qualidade;
- Definição dos transportes necessários;
- Definição do plano para a montagem da estrutura em obra.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se repartida em seis capítulos que são descritos nos seguintes pontos:

- Capítulo 1 – aqui é realizada uma pequena contextualização do tema geral do relatório e onde são apresentados os objetivos do trabalho que foram delineados;
- Capítulo 2 – este capítulo diz respeito à abordagem teórica efetuada aos conteúdos fundamentais da dissertação;
- Capítulo 3 – aqui é apresentado todo o trabalho desenvolvido durante o estágio, tendo em vista o cumprimento dos objetivos apresentados anteriormente;
- Capítulo 4 – neste capítulo é apresentada a análise ao trabalho desenvolvido e as principais conclusões a retirar, apresentando-se também sugestões a aplicar em trabalhos futuros;
- Capítulo 5 – são apresentadas as referências bibliográficas necessárias à realização do relatório;
- Capítulo 6 – são apresentados os anexos que servem de apoio ao trabalho desenvolvido no capítulo 3.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Projeto de estruturas metálicas
- 2.2 Projeto de pontes
- 2.3 Gestão de projetos de grandes dimensões

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Projeto de estruturas metálicas

Neste capítulo, serão introduzidos alguns tópicos que definem o projeto de uma estrutura metálica. Este tipo de estrutura tem sido muito popularizado pela sua grande aplicabilidade, tornando-se necessário definir referências de qualidade que uniformizem os processos envolvidos no seu projeto, como os materiais aplicáveis, os tipos de ligação e as soluções construtivas.

2.1.1 Regulamentação utilizada

A necessidade de criação de soluções estruturais mais complexas e seguras levam à criação de documentos que regulamentam a atividade de projeto. O dimensionamento da estrutura de uma ponte, por exemplo, no continente europeu, pode exigir a utilização das seguintes normas [3]:

- EN 1991 – Ações em estruturas (Eurocódigo 1);
- EN 1993 – Projeto de estruturas de aço (Eurocódigo 3);
- EN 1994 – Projeto de estruturas mistas aço-betão (Eurocódigo 4);
- EN 206 – Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade;
- EN 10080 – Aço para reforço de betão;
- EN 1337-5:2005 – Aparelhos de apoio estruturais – Parte 3: Apoios elastoméricos.

No entanto, o projeto de uma ponte para o continente africano também poderá ter por base as normas europeias, se assim o for recomendado, servindo de apoio às referências normativas aplicadas ao continente referido anteriormente. No caso específico de uma ponte ferroviária, são recomendadas as seguintes normas [3]:

- SATCC: 1998 – Código de prática para o projeto de pavimentos rodoviários;
- TMH7:1989 – Parte 3 – Código de prática para o projeto de pontes rodoviárias e sistema de drenagem de águas residuais na África do Sul;
- SATS: 1983 – Serviços de transporte na África do Sul – Código de pontes.

Em relação à gestão da qualidade, o planeamento dos processos é um fator fundamental para assegurar a qualidade necessária das atividades. Como consequência deste fator, deve ser desenvolvido e implementado o controlo de qualidade que permite estabelecer os materiais, procedimentos e parâmetros necessários à execução das atividades descritas no planeamento [4]. Para a correta definição do planeamento de processos e posterior execução do controlo de qualidade podem ser utilizadas as normas mencionadas na Tabela 1 [5].

Tabela 1 – Regulamentação utilizada para controlo de qualidade (adaptado de [5])

| | | | |
|----------|--------------------------|--|----------------|
| Material | Aço estrutural | | EN 10025 |
| | Conectores | | EN ISO 13918 |
| | | | |
| | Consumíveis de soldadura | Eléktrodos | EN ISO 14171 |
| | | | EN ISO 14174 |
| | | | EN ISO 17632-A |
| | Gás de proteção | EN ISO 14175 | |
| Fabríco | Geral | | EN ISO 1090-2 |
| | Soldadura | Procedimentos e especificações de soldadura (Geral) | EN ISO 3834-2 |
| | | Certificação de soldadores | EN ISO 9606-1 |
| | | Verificação da qualificação dos soldadores e/ou procedimentos de soldadura | EN ISO 287-1 |
| | | | EN ISO 1418 |
| | | | EN ISO 14732 |
| | EN ISO 14555 | | |
| | | Especificações da execução da soldadura | EN ISO 15614-1 |
| | | | EN ISO 15609-1 |
| | | EN ISO 1011-1,2 | |

| | | | |
|----------|------------------------|------------------------------------|----------------|
| Montagem | Tratamentos corrosivos | Preparação das superfícies | EN ISO 8501-1 |
| | | Revestimento corrosivo de proteção | EN ISO 12944-5 |
| | Montagem | Montagem de estruturas | EN ISO 1090-2 |

2.1.2 Tipos de estruturas

As estruturas metálicas são cada vez mais utilizadas como solução construtiva devido às vantagens que possuem quando comparadas com estruturas de betão e madeira. Estima-se que 40% do aço de estrutural laminado a quente produzido no Reino Unido seja utilizado para fabricar estruturas de armazéns industriais. A ótima resistência dos aços, a facilidade de montagem e fabrico das estruturas e a flexibilidade arquitetónica são alguns fatores que, quando aliados a um bom projeto e uma equipa de fabrico bem qualificada, permitem uma vasta aplicabilidade às estruturas metálicas [6]. Dependendo da função a que as estruturas metálicas estão destinadas, podem ser concebidas para a realização de pavilhões industriais, edifícios empresariais ou residenciais, pontes, estruturas treliçadas, silos, coberturas, entre outros. A Figura 1 ilustra algumas das aplicações possíveis de estruturas metálicas.



Figura 1 – Tipos de estruturas metálicas [7-10]

2.1.3 Materiais aplicáveis

O ferro fundido e o ferro forjado foram, até meados do século XIX, os principais materiais de construção de estruturas. Em 1856, nos Estados Unidos da América, foi fabricado pela primeira vez o aço, e desde então tem sido o principal material empregue na construção de estruturas metálicas [11]. A utilização do aço em aplicações estruturais deve-se principalmente ao elevado rácio entre resistência-peso, à gama de geometrias em que pode ser apresentado, ao controlo que é possível ter sobre as suas propriedades, e por ser um material reciclável e apresentar boa soldabilidade, dependendo do teor de carbono [6, 11].

Para pontes com vãos longos (superiores a 80 m), o aço tem sido uma escolha natural para a sua construção desde 1890. No entanto, a partir de 1950, o desenvolvimento do aço como material estrutural, das técnicas de soldadura e dos métodos de construção permitiram ao aço melhorar a sua quota no mercado Europeu e noutros continentes para mais de 50% em pontes com vãos curtos (até 30 m) e médios (entre 30 m e 80 m) [6]. A Figura 2 ilustra, até à data de 1919, a ponte com o maior vão (521 m) construída em estrutura metálica [12]. Em estruturas de pontes, são geralmente utilizados quatro tipos de aços estruturais: aço-carbono estrutural, aço de baixa liga de alta resistência, aço de baixa liga tratado termicamente e aço de liga de alta resistência tratado termicamente [13].



Figura 2 – Forth Bridge (Edinburgh, Escócia) [12]

2.1.4 Diferentes elementos construtivos

A construção de uma ponte é tipicamente composta por dois elementos: a subestrutura e a superestrutura [14]. A Figura 3 representa o esquema geral da estrutura de uma ponte. A subestrutura consiste de todos os elementos que suportam a superestrutura, sendo eles:

- **Encontros:** Fazem a ligação da superestrutura com os aterros feitos nas extremidades da ponte e têm a função de suportar as cargas que lhes são transmitidas;
- **Pilares:** São os elementos que suportam a superestrutura entre os encontros;
- **Fundações:** São elementos que se encontram abaixo no nível do solo, sob os encontros e os pilares, com a função de suportar as cargas e o peso de toda a estrutura da ponte.

A superestrutura consiste nos elementos que suportam as cargas transmitidas pelos veículos ao longo do tabuleiro da ponte para a subestrutura e todos os componentes de ligação e segurança. Os principais constituintes deste elemento são:

- **Guarda metálica:** Elemento com a função de proteger os veículos e/ou pessoas de saírem do tabuleiro da ponte;
- **Tabuleiro:** Consiste no elemento que está em contacto direto com os veículos e que suporta, num primeiro momento, as cargas por eles transmitidas;
- **Junta de dilatação:** Elemento responsável por garantir, em segurança, a expansão ou contração da estrutura da ponte, devido a variações de temperatura;
- **Aparelho de apoio:** Elemento que garante o isolamento da subestrutura dos deslocamentos e rotações causados na superestrutura;
- **Estrutura dos vãos:** É o elemento que caracteriza a geometria da ponte e a sua definição depende da carga que lhe vai ser aplicada, do procedimento de montagem e dos recursos disponíveis.

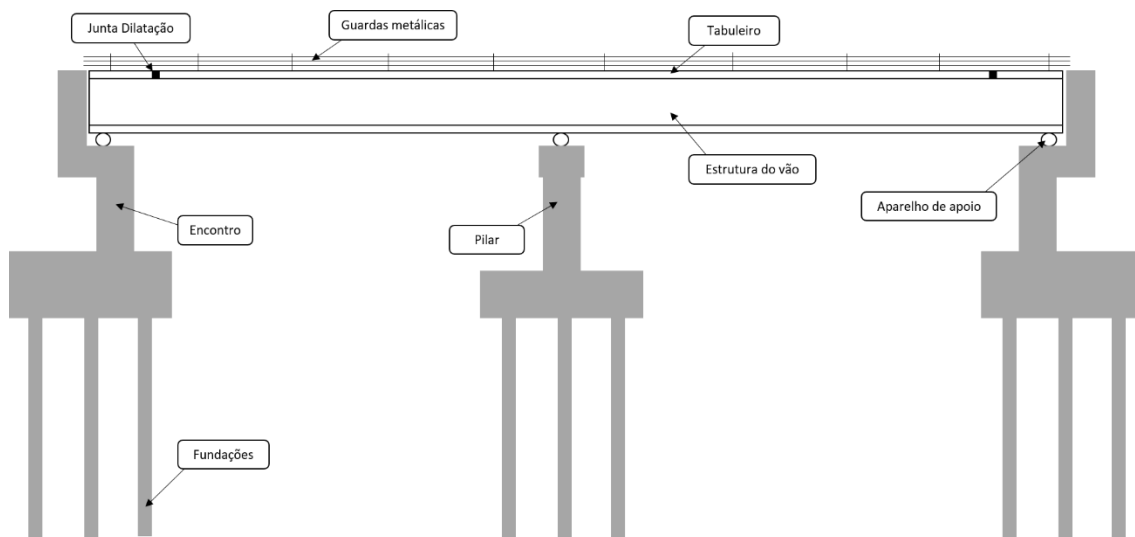


Figura 3 – Esquema da estrutura de uma ponte. A cinzento escuro está representada a subestrutura, os restantes elementos representam a superestrutura (adaptado de [14])

2.1.5 Ligações entre elementos metálicos

No fabrico de estruturas metálicas, o termo ligação é aplicado a todos os detalhes construtivos que promovam a união entre partes integrantes da estrutura ou com elementos externos a esta. Os desenvolvimentos recentes no projeto, fabrico e montagem de estruturas metálicas, associados à introdução de novos materiais de construção, têm conduzido a modificações nos métodos de dimensionamento das ligações estruturais. Atualmente, as ligações podem ser económicas de fabricar e montar com um nível de segurança superior, podendo até ser utilizadas em estruturas de cariz mais estético. A escolha do tipo de ligação depende de fatores como o custo, a sequência de montagem da estrutura e a preferência do contratante. No passado, era comum a utilização de rebites como elemento de ligação mas, com o desenvolvimento tecnológico, tem-se generalizado a utilização de ligações soldadas em oficina e aparafusadas em obra [11, 15].

2.1.5.1 Ligações soldadas

A soldadura é, atualmente, o método de ligação mais comum no fabrico de estruturas metálicas, substituindo as ligações tradicionais que usam parafusos e rebites [16]. Sem este processo não seria possível a construção de edifícios e pontes com geometrias modernas e complexas [6]. No entanto, ainda é frequente a utilização combinada das ligações soldadas com as aparafusadas, realizadas em oficina e em obra, respetivamente. Em estruturas metálicas é recomendada a utilização de soldadura por arco, exceto em casos particulares, como é o caso da soldadura de conetores. Nas ligações soldadas, a união de componentes pode ser realizada através da fusão do material de base com o material de adição ou através do caldeamento do material base induzido por energia mecânica. A Figura 4 ilustra um exemplo de uma ligação soldada.



Figura 4 – Ligação soldada de elementos metálicos (elaboração própria)

As ligações soldadas, quando comparadas com outros métodos de ligação, apresentam vantagens como [11, 17]:

- A resistência elevada da junta que, normalmente, ultrapassa a dos materiais de base;
- A facilidade de introdução de elementos que aumentam a rigidez;
- A capacidade de assegurar a continuidade metálica da ligação;
- A necessidade de um menor número de chapas de ligação, o que faz diminuir o peso da estrutura;
- A capacidade de ligação de uma grande gama de espessuras;
- A boa relação de custo-benefício;
- A liberdade de *design* no desenvolvimento de estruturas.

Em contrapartida, a soldadura é um método de ligação que requer uma grande habilidade do operador, é um processo mais demorado e está sujeito a inspeções mais exigentes, pois a manifestação de defeitos é mais suscetível neste tipo de ligação [11].

2.1.5.2 Ligações aparafusadas

A ligação aparafusada é o tipo de ligação mais comum e económica que pode ser utilizada, após o declínio das ligações rebitadas. Este tipo de ligações generalizou-se devido à sua facilidade de fabrico e montagem em obra. A Figura 5 apresenta uma solução para a ligação aparafusada num pórtico. A introdução de aços de alta resistência fez aumentar a variedade de parafusos no mercado, podendo estes dividir-se em dois tipos básicos: parafusos normais e parafusos de alta resistência. Os parafusos normais são utilizados em estruturas secundárias, como por exemplo guarda-corpos, plataformas de serviço e todo o tipo de estruturas que estejam sujeitas a cargas elevadas e/ou cíclicas. Os parafusos de alta resistência podem ter mais do dobro da resistência dos parafusos comuns e são capazes de resistir a fenómenos de fadiga, sendo estas as principais razões que fazem deste tipo de parafusos os mais utilizados em ligações de estruturas metálicas [11, 15]. Quando se comparam os diferentes tipos de ligações, as que utilizam parafusos como elementos de ligação apresentam algumas das seguintes vantagens [18]:

- As técnicas de fabrico dos componentes envolvidos são facilmente replicadas;
- Não há necessidade de especialização dos operadores para o processo de montagem devido à utilização de ferramentas simples;
- Após a montagem, a ligação é capaz de resistir, no imediato, à carga para a qual foi dimensionada;
- Permite a desmontagem da estrutura e a substituição dos elementos envolvidos na ligação.



Figura 5 – Ligação aparafusada de elementos metálicos [19]

2.1.5.3 *Ligações rebitadas*

As ligações rebitadas (Figura 6) são o método mais antigo de ligação de materiais. A utilização de rebites como elemento de ligação foi muito popular no século XX, mas desde o aparecimento dos parafusos de alta resistência entraram em desuso. Atualmente, este tipo de ligação raramente é utilizado em ligações realizadas em oficina ou em obra. No entanto, a importância de saber avaliar este tipo de ligações mostra-se em crescendo devido à necessidade de inspeção de estruturas antigas que utilizem esta ligação [20]. Quando comparadas com as ligações aparafusadas, as ligações rebitadas [21]:

- Têm uma carga de fixação inferior devido à ausência de rosca;
- Necessitam de uma ferramenta especial para a montagem;
- Podem ser montadas apenas a partir de um dos lados da ligação;
- Não apresentam o risco de desaperto da ligação devido à vibração da estrutura;
- Não possibilitam a reutilização dos rebites.



Figura 6 – Ligação rebitada de elementos metálicos [22]

2.1.5.4 Outras ligações

- **Ligações adesivas**

As ligações adesivas (Figura 7) surgiram como uma alternativa às ligações mecânicas e têm como principais vantagens não afetarem a continuidade dos materiais envolvidos na ligação e as suas propriedades, não introduzirem tensões térmicas nos materiais e conseguem distribuir de uma forma mais uniforme as tensões [23]. Apesar disso, este tipo de ligação apresenta desvantagens como a fraca resistência em condições extremas, e a forças de arrancamento e clivagem [24]. Os adesivos têm sido utilizados desde há muitos séculos, mas foi nos últimos 60 anos, com ajuda da indústria aeronáutica, que tiveram a sua grande evolução. Este desenvolvimento permite, nos dias de hoje, que a aplicação de ligações adesivas noutras indústrias seja cada vez mais comum. Um exemplo desta aplicabilidade é na área da construção civil em estruturas como pontes, postes, painéis, entre outras. Enquanto utilizado numa ligação estrutural, um adesivo pode ser definido como um material polimérico que é capaz de resistir a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura [24].

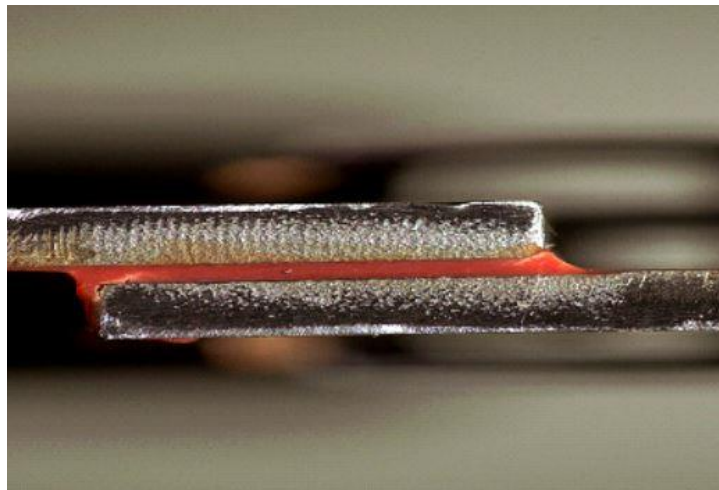


Figura 7 – Ligação adesiva de elementos metálicos [25]

- ***Clinching***

O progresso no estudo do projeto de construções de paredes finas levou ao desenvolvimento de novos métodos de ligação, como é o caso do *clinching*. Este método tem a sua primeira patente registada em 1897, no entanto, foi nos últimos 30 anos que teve uma evolução significativa [26]. Este tipo de ligação é realizado de forma imediata e consiste na penetração entre os materiais (Figura 8). O *clinching* não é o método de ligação ideal para estruturas, mas apresenta-se como uma alternativa às ligações aparafusadas e à soldadura por resistência. Atualmente, a verificação das propriedades mecânicas só é realizada de forma experimental e o desenvolvimento deste método passa pela criação de um procedimento normativo capaz de prever essas propriedades [27].

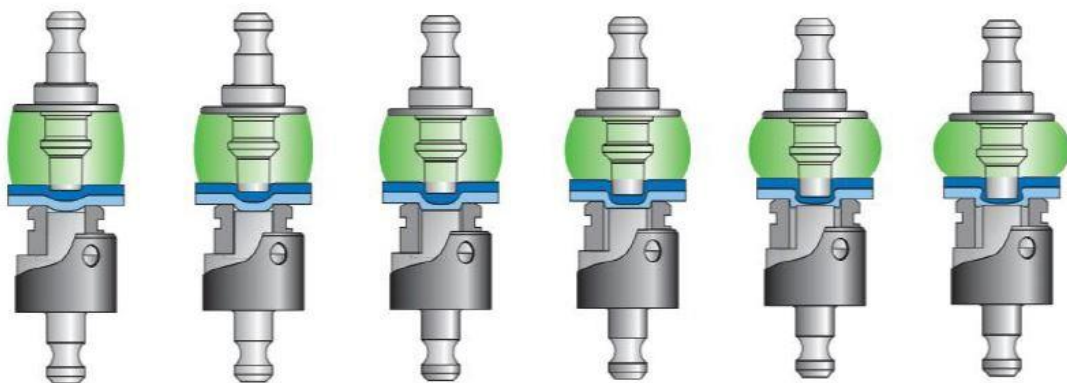


Figura 8 – Ligação do tipo *clinching* [27]

- **Ligações híbridas** – ligação rebitada com colagem

O objetivo das ligações híbridas é unir as vantagens de ambos os métodos de ligação e eliminar as suas limitações. Nas ligações rebitadas com colagem, a utilização de adesivos ajuda a melhorar a resistência e a rigidez da junta, de modo a reduzir o número de rebites necessários. Além disto, o adesivo tem uma influência positiva na distribuição das cargas, faz diminuir os picos de tensão existentes nos furos para os rebites e funciona como barreira protetora contra a corrosão entre os elementos metálicos. A utilização de rebites, para além dos motivos já referidos anteriormente, deve-se ao facto de aumentar a força necessária para a separação dos elementos [28, 29].

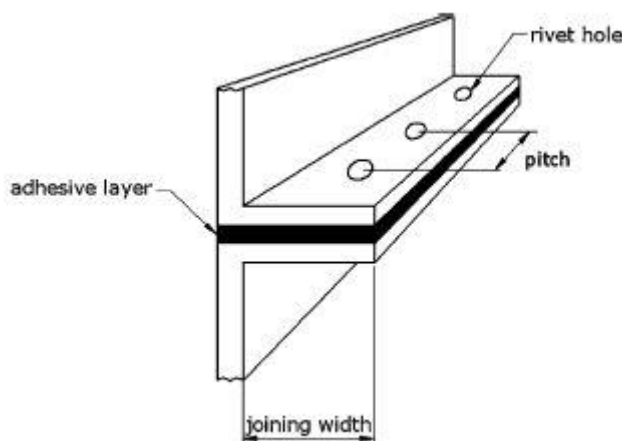


Figura 9 – Ligação rebitada com colagem entre elementos metálicos [29]

2.2 Projeto de pontes

Neste capítulo, serão abordadas as particularidades gerais que devem ser consideradas no projeto de uma ponte ferroviária. Em seguida, identificam-se os esforços aplicados sobre a estrutura que influenciam diretamente a escolha da geometria e apresenta-se a metodologia de cálculo aplicada.

2.2.1 Particularidades no projeto de pontes

Uma ponte é por definição uma estrutura que tem como objetivo ser uma solução quando é apresentado um obstáculo à continuidade da via. O projeto de uma ponte deve considerar uma análise prévia à função e desempenho destinados à estrutura. A segurança, os custos da obra e o impacto ambiental são fatores que influenciam a análise de um projetista sobre considerações, por exemplo, da geometria e materiais [13].

No caso mais particular das pontes ferroviárias, as considerações de projeto destas levantam algumas diferenças quando comparadas com as pontes rodoviárias [13]:

- A relação entre as cargas dinâmicas e estáticas numa ponte ferroviária é superior à observada numa ponte rodoviária, para o mesmo comprimento e tipo de estrutura;
- Vãos descontínuos são preferíveis para pontes ferroviárias, devido a intervenções de manutenção e/ou substituição dos elementos. Vãos contínuos são mais comuns em pontes rodoviárias;
- As medidas de intervenção num processo de manutenção são mais críticas numa ponte ferroviária devido à dificuldade apresentada em desviar e controlar o fluxo de comboios;
- O movimento da estrutura devido, por exemplo, a dilatações térmicas, deve ser acompanhado por um mesmo movimento da linha do comboio, sem exceder as tolerâncias impostas pela normalização aplicada;
- Normalmente, é esperado um tempo de vida útil mais longo para uma ponte ferroviária do que para uma rodoviária.

2.2.2 Tipos de geometrias utilizadas em pontes

A escolha da geometria numa ponte determina como serão distribuídas as forças internas. Fatores como o comprimento do vão e as cargas impostas na estrutura são determinantes na decisão da geometria. As geometrias mais comuns que podem ser encontradas são:

- **Pontes suspensas** (Figura 10): são utilizadas para grandes comprimentos de vão quando a construção de pilares intermédios não é viável. Este tipo de ponte utiliza um sistema de cabos para suportar o peso do tabuleiro e dos veículos. Os cabos são ancorados, em ambas as extremidades, ao solo, fazendo-os passar pelas torres. A construção deste tipo de pontes é mais demorada porque o tabuleiro não pode ser construído até que as torres, os apoios e os cabos estejam montados. O projeto de pontes suspensas deve considerar o seu comportamento aerodinâmico, uma vez que grande parte da estrutura é flexível e pode responder, com intensidade, às forças do vento, de um terramoto e até mesmo das vibrações provocadas pelos veículos [6, 30, 31].



Figura 10 – Ponte 25 de Abril (Lisboa, Portugal) [32]

• **Ponte de tirantes** (Figura 11): esta geometria utiliza um sistema de cabos idêntico à ponte suspensa, estando a diferença presente na sua fixação. A ponte de tirantes é uma estrutura capaz de fazer a própria ancoragem, isto é, as extremidades dos cabos estão diretamente conectadas à estrutura do vão da ponte. No entanto, apesar de ser uma solução geométrica que depende menos das condições das fundações, o tabuleiro da ponte deve ser projetado para suportar os esforços axiais, da componente horizontal, transmitidos pelos cabos. Relativamente ao processo de construção, os cabos e o tabuleiro podem ser montados ao mesmo tempo, reduzindo o tempo de montagem quando comparado com a ponte suspensa. Além disso, com esta geometria, o comportamento aerodinâmico deixa de ser um problema significativo, ainda que deva ser considerado no projeto [6, 31].



Figura 11 – Ponte Internacional do Guadiana (Vila Real St. António, Portugal) [33]

- **Ponte em arco** (Figura 12): este tipo de geometria é adequado quando a utilização de pilares intermédios não é viável devido às condições do local, como por exemplo numa ravina e quando se pretende que os esforços aplicados sejam direcionados diretamente para os encontros. O arco é o principal elemento estrutural deste tipo de geometria e é o principal responsável pela transmissão dos esforços aplicados, no entanto, os encontros são elementos com grande importância pois devem ser projetados de forma a serem capazes de suportar todos os esforços [6, 30, 31].

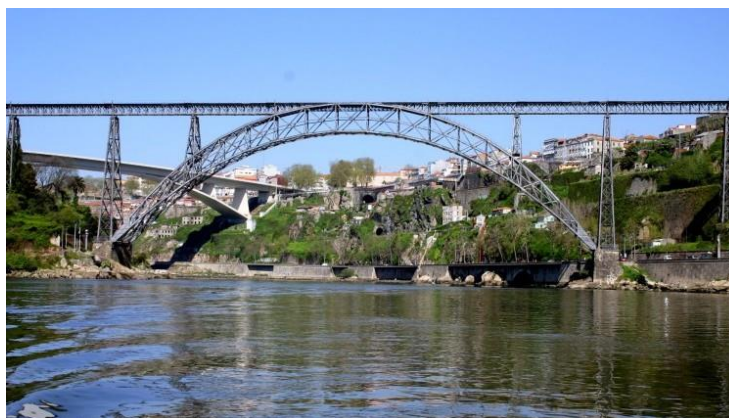


Figura 12 – Ponte D. Maria Pia (Porto, Portugal) [34]

- **Ponte em pórtico** (Figura 13): é uma geometria adequada para pequenos e médios vãos e é uma solução viável nas mesmas condições que a ponte em arco. A estrutura é composta por pilares verticais ou inclinados que são fixos às fundações através de apoios capazes de transmitir o esforço do momento fletor. Em termos de projeto, deve ser levado em consideração o risco de colisão de, por exemplo, barcos com os pilares, para pontes sobre rios navegáveis. Fatores económicos não favorecem esta geometria devido aos detalhes complexos que podem ser exigidos nos apoios e à dificuldade inerente de montagem [6, 30].



Figura 13 – Ponte de Languedoc (Saint-André-de-Sangonis, França) [35]

• **Ponte treliçada** (Figura 14): é uma geometria muito comum e é, normalmente, utilizada para vãos médios. É composta por barras que formam uma malha triangular capaz de distribuir as tensões por toda a estrutura, permitindo que a ponte seja apoiada em segurança e sustente o seu próprio peso, o peso dos veículos e as forças do vento. A estrutura treliçada não suporta o tabuleiro pela parte superior nem pela parte inferior, como acontece com as pontes suspensas e em arco, respetivamente. Em vez disso, este tipo de geometria torna o tabuleiro mais rígido de maneira a manter-se unido contra as forças aplicadas. Este tipo de ponte é apoiada nos encontros e, dependendo da necessidade podem ser utilizados pilares intermédios. A ponte treliçada é popular devido à sua resiliência, resistência mecânica e construção económica [6, 31].



Figura 14 – Ponte Taylor Southgate (Newport, USA) [36]

• **Ponte *Cantilever*** (Figura 2): é um tipo de ponte que utiliza elementos estruturais, que se projetam na horizontal e têm o seu movimento restringido numa das extremidades, para suportar as cargas exercidas na estrutura global. Os elementos devem estar bem ancorados de forma a evitar tensões de corte e devem resistir aos esforços de tração e compressão nas partes superior e inferior, respetivamente. Para pequenas pontes, podem ser utilizadas vigas como elementos estruturais, no entanto, para pontes de dimensões elevadas e que estão sujeitas a uma carga mais elevada são utilizadas, por exemplo, treliças. Este tipo de geometria é especialmente útil quando se pretende atravessar um canal sem recorrer à utilização de pilares intermédios. Em termos de construção, o primeiro passo é fazer a ligação do elemento estrutural ao encontro e, em seguida, montar o elemento que fica suspenso entre os dois elementos estruturais. Caso a distância a atravessar seja longa, podem ser utilizados elementos construídos sob pilares intermédios. Neste caso, os elementos suspensos serão os últimos a ser montados [37, 38].

- **Ponte de viga** (Figura 15): é o tipo de geometria que predomina sobre os tipos de pontes descritos anteriormente, para curtos e médios vãos, devido à sua simplicidade de construção e económica. Uma ou mais vigas podem ser utilizadas na construção deste tipo de pontes para aumentar a secção transversal da estrutura e/ou distribuir melhor as cargas sobre os pilares e encontros. As ações que mais impacto têm nesta geometria são a flexão e o corte que ocorre nos vãos, e que são depois transferidos para a subestrutura. Neste tipo de pontes, a estrutura do vão pode adotar diferentes geometrias, como por exemplo vigas simples e vigas em caixão [6, 31].



Figura 15 – Ponte Foyle (Londonderry, Irlanda do Norte) [39]

As diferentes geometrias, anteriormente apresentadas, podem assumir variações na estrutura do vão, ou seja, uma ponte suspensa pode, por exemplo, utilizar vigas ou treliças para suportar o seu tabuleiro, mantendo as suas condições de funcionamento, *design* e montagem. As estruturas do vão mais utilizadas são as vigas em caixão devido à sua elevada rigidez de flexão e torção. No entanto, o aumento do comprimento do vão, e o respetivo aumento do peso da estrutura, inviabiliza este tipo de estrutura para pontes com elevados comprimentos de vão. Como resposta a este problema, surgem estruturas compostas em aço e betão, por exemplo, as estrutura em vigas de aço e lajes de betão [40].

No que diz respeito a pontes ferroviárias, uma revisão realizada na indústria mostra que na sua grande maioria estas são construídas com vãos descontínuos. Exceções são abertas para pontes que necessitam de atravessar grandes rios ou em locais com características topográficas mais adversas, como desfiladeiros, onde é recorrente a utilização de pontes com geometrias mais complexas. Devido à magnitude das cargas aplicadas pelos comboios, geometrias como pontes suspensas e de tirantes são excluídas devido à deflexão e às forças de corte aplicadas. Além disso, sempre que possível deve-se evitar projetar uma ponte ferroviária com curvas e inclinação [13].

2.2.3 Tipos de cargas

As pontes podem ser construídas com diferentes geometrias e, como referido anteriormente, o carregamento a que a estrutura será sujeita tem influência na definição da geometria. Para pontes ferroviárias, a norma EN 1991-2 [41] especifica as cargas que devem ser consideradas no dimensionamento, sendo algumas delas:

- Peso próprio da estrutura;
- Ação do vento;
- Ação da neve;
- Variação de temperatura;
- Pressão da Terra;
- Peso do comboio (Por exemplo: modelo de carga 71 – Figura 16)
- Cargas sísmicas;
- Vibrações provocadas pelo fluxo de comboios;
- Forças de aceleração e travagem.

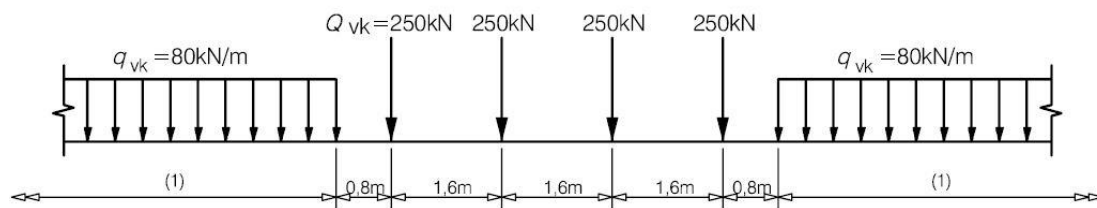


Figura 16 – Modelo de carga 71 [41]

2.2.4 Método de cálculo

Segundo as normas EN 1993-1-1 [42] e EN 1993-2 [43], a análise de uma estrutura deve considerar o estudo da estrutura, das ligações e da interação terreno-estrutura. O método de cálculo para a estrutura deve basear-se no estado limite adequado e refletir, com precisão, o comportamento previsto para a estrutura. A combinação das cargas pode ser realizada através dos seguintes critérios:

- **Estado limite último (ELU)** – garante a segurança relativamente ao colapso da estrutura. A sua verificação é efetuada através da tensão máxima instalada na estrutura;
- **Estado limite serviço (ELS)** – garante a segurança relativamente ao serviço da estrutura, conforto das pessoas e construção. A sua verificação é realizada através da deformação máxima admitida pela estrutura.

O procedimento de cálculo das ligações deve assegurar que todas as juntas têm uma resistência tal que a estrutura seja capaz de satisfazer todos os requisitos presentes nas normas EN 1993-1-1 [42] e EN 1993-1-8 [44]. A determinação dos esforços aplicados à junta é realizada através do ELU e a sua resistência é determinada com base na resistência individual dos elementos que compõem a ligação. Relativamente à interação terreno-estrutura, o método de cálculo deve ter por base a norma EN 1997-1 [45] e envolver fatores como as propriedades e as ações aplicadas ao terreno.

2.3 Gestão de projetos de grandes dimensões

No decorrer deste capítulo, serão abordados assuntos referentes à gestão da preparação e fabrico de projetos. Cada um dos próximos subcapítulos corresponde a uma etapa do processo de gestão, que devem estar interligadas através da comunicação entre os diferentes setores, sem existir perda de informação.

2.3.1 Análise preliminar do projeto

A análise preliminar ao projeto tem como objetivo a otimização do mesmo em termos de modelação, para que à posteriori se consiga poupar tempo no fabrico e montagem. De uma forma genérica, a otimização é sinónimo de uma reestruturação efetuada com o objetivo de obter um maior rendimento de um determinado processo ou da determinação da solução mais eficiente de um problema [46].

A análise preliminar de um projeto é realizada num todo, isto é, todos os elementos e/ou etapas de projeto têm influência direta umas nas outras e a falha de uma pode prejudicar de forma crítica as etapas seguintes. Na sua generalidade, a otimização de um projeto passa pela análise de [47]:

- **Desenhos:** estes elementos permitem a análise geométrica de toda a estrutura e avaliação das melhores soluções para o fabrico e montagem, possibilitando também a definição do plano de trabalhos;
- **Material:** a análise do material deve ser efetuada de forma a verificar o cumprimento das suas funções e, se possível, diminuir a porção de materiais dissimilares para minimizar a ocorrência de erros na modelação e consequentemente no fabrico;
- **Modelação:** esta é uma etapa onde a análise das anteriores é aplicada e a última em que há possibilidade de intervenção no projeto. Em relação a este ponto, devem ser analisadas as condicionantes de fabrico e montagem;

- **Fabrico:** é a etapa onde são aplicadas as considerações tomadas na etapa de modelação com vista à redução dos tempos de fabrico. As condicionantes e procedimentos de fabrico devem ser analisados de forma a assegurar a qualidade pretendida para a peça ou estrutura;
- **Montagem:** tal como no fabrico, esta etapa deve respeitar as considerações tomadas na modelação. Em relação a esta etapa, deve ser pensado o processo mais adequado, as ferramentas e elementos auxiliares que facilitem a montagem da estrutura principal.

2.3.2 Modelação 3D e desenhos técnicos

Um dos *softwares* aplicáveis para a realização da preparação do fabrico de projetos é o Tekla Structures que utiliza o conceito *Building Information Modeling* (BIM). De forma geral, a elaboração de um projeto pressupõe a idealização da estrutura no espaço tridimensional, com a finalidade de obter as representações bidimensionais dos elementos que a constituem [48, 49]. Com a utilização do BIM, o processo de modelação baseia-se na construção do modelo tridimensional capaz de incluir um conjunto de informações externas, como por exemplo os materiais e as suas propriedades, a identificação de elementos normalizados e dos seus fornecedores e o planeamento da obra. A principal vantagem do BIM está na sua base de dados interna onde é organizada toda a informação do projeto. A facilidade com que é possível interagir com a base de dados permite agilizar o processo de modelação, possibilitando o aumento da produtividade e da qualidade, e o desenvolvimento de projetos mais complexos [50]. A Figura 17 apresenta alguns dos menus disponíveis no Tekla Structures. Outros exemplos de *softwares* que utilizam o conceito BIM são:

- **Autodesk Revit** [51]: é um dos *softwares* mais conhecidos para modelação 3D e foi desenvolvido para a elaboração de plantas, maquetes, simulações de quantidades de materiais, entre outras funcionalidades. Os profissionais que utilizam o Revit conseguem desenvolver de uma forma melhorada cada etapa de projeto, compatibilizando os serviços e identificando os possíveis problemas;
- **ArchiCAD** [52]: é um *software* líder nas áreas de arquitetura e *design* que permite a combinação de aspetos arquitetónicos e de engenharia durante todo o processo de modelação. O ArchiCAD apresenta uma aparência gráfica apelativa e oferece ferramentas intuitivas e inovadoras que possibilitam a criatividade dos seus utilizadores;
- **Autodesk Navisworks** [53]: este *software* possui capacidades semelhantes ao Revit, no entanto foca-se mais na gestão e simulação da obra.

Quando se compara a tecnologia BIM com o *Computer Aided Design* (CAD), esta apresenta vantagens como [54]:

- Possibilidade de gerar automaticamente desenhos técnicos e listas de materiais;
- A partilha de informações entre os diferentes intervenientes do projeto, facilitando o trabalho em equipa;
- A interligação das informações através de relações paramétricas, permitindo o processamento das alterações no modelo em tempo real.

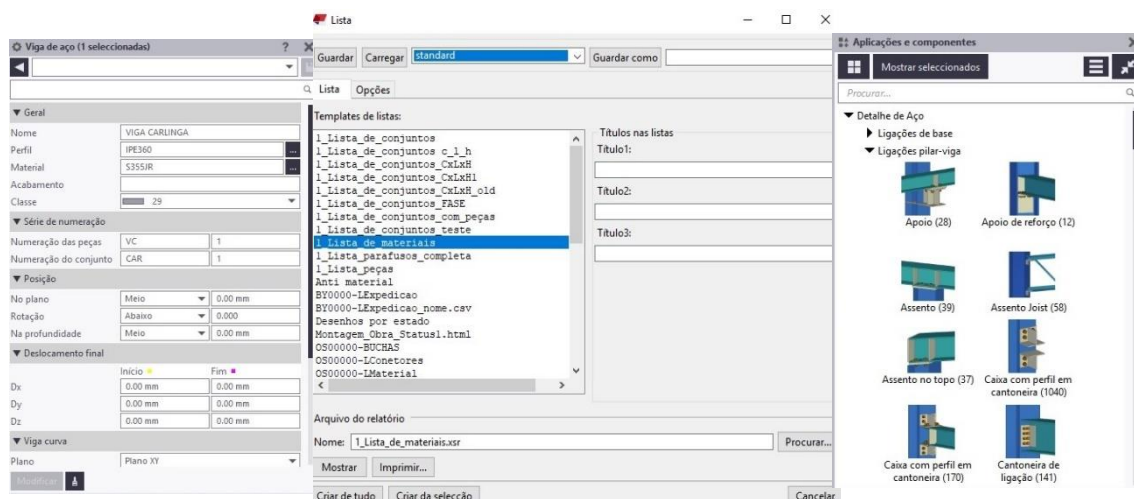


Figura 17 – Propriedades disponíveis para os elementos (direita); Base de dados de relatórios (centro); Base de dados de ligações (esquerda) (elaboração própria)

2.3.3 Planeamento de fabrico

O sucesso de um projeto depende muito da forma como este é planeado. Independentemente do setor de atividade ou da fase de projeto, a estruturação de um planeamento permite, antecipadamente, definir todos os pormenores, antever possíveis dificuldades e a criação das soluções necessárias. No caso particular do fabrico, o seu planeamento deve partir da análise pormenorizada dos dados disponibilizados pelo cliente. É nesta fase que devem ser identificados todos os entraves à execução do projeto e as possíveis otimizações dos processos. A correta elaboração de um plano de fabrico permite organizar, planear e definir aspetos como:

- Número de colaboradores necessários;
- Tempos associados a cada operação;
- Prazos de preparação de obra, receção de material, fabrico e expedição;
- Controlo financeiro do projeto;
- Ferramentas, meios e materiais necessários.

Naturalmente, nenhum planeamento é isento de falhas e contratempos, e é por isso que, com o decorrer dos processos, é importante manter o acompanhamento constante dos mesmos e efetuar as correções necessárias no plano de fabrico [55].

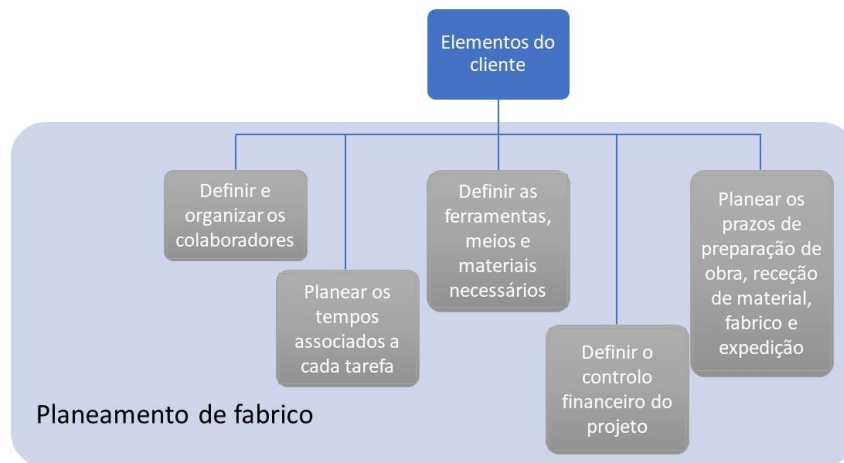


Figura 18 – Esquema para elaboração de um plano de fabrico (elaboração própria)

2.3.3.1 Documentação necessária

O plano de processos é geralmente definido por dois documentos específicos para cada projeto: a folha de gama operatória e a folha de operação. Em projetos mais complexos que incorporem diversas peças e subconjuntos, torna-se importante um documento auxiliar que discrimine todos os elementos necessários à montagem da estrutura final. A folha de gama operatória (Figura 19) descreve genericamente todo o processo de fabrico das peças, indicando cada etapa de fabrico, as ferramentas e equipamentos necessários, os tempos estimados, entre outros. A folha de operação é preparada especificamente para cada etapa do fabrico e é utilizada pelo colaborador responsável pela sua execução. Neste documento são especificadas informações como o método de execução, as variáveis inerentes à operação e a sequência [56].

| | | |
|--|--------------------------|----------|
| | FOLHA DE GAMA OPERATÓRIA | OBRA Nº: |
| | | O.P. Nº: |
| | | P.F. Nº: |

| Nome conjunto/peça | Referência conjunto/peça |
|--------------------|--------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |


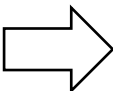

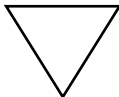

Figura 19 – Exemplo de folha de gama operatória (adaptado de [56])

2.3.3.2 Sequência de fabrico

O produto final resulta, normalmente, de várias operações de fabrico que vão gradualmente produzindo as diferentes peças e subconjuntos até se atingir a montagem do conjunto final. A sequência de fabrico toma como ponto de partida um conjunto de entradas que, com o decorrer das operações, são transformadas em saídas de maior valor acrescentado. As operações podem estar sujeitas a controlos responsáveis por garantir a qualidade das peças. As entradas podem ser classificadas como matéria-prima, mão-de-obra, energia, informação, entre outros. As saídas podem ser bens ou serviços da mesma natureza que as entradas.

A definição da sequência de fabrico pode ser representada através de um diagrama de processo (Figura 20), utilizando a simbologia das atividades apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Simbologia de atividades (adaptado de [56])

| Atividade Básica | Significado | Símbolo |
|----------------------------|---|---|
| Operação de transformação | Alteração da geometria e/ou características do material para a obtenção de produtos semiacabados ou do produto final. |  |
| Transporte ou manuseamento | Alteração de lugar do material, do produto semiacabado ou do produto final. |  |
| Inspeção | Realização de ensaios de acordo com as normas aplicáveis com o objetivo de avaliar a existência de defeitos nos produtos. |  |
| Retenção (armazenamento) | Acumulação programada de materiais, componentes ou produtos. |  |
| Atividade combinada | Realização da operação de transformação com inspeção. |  |

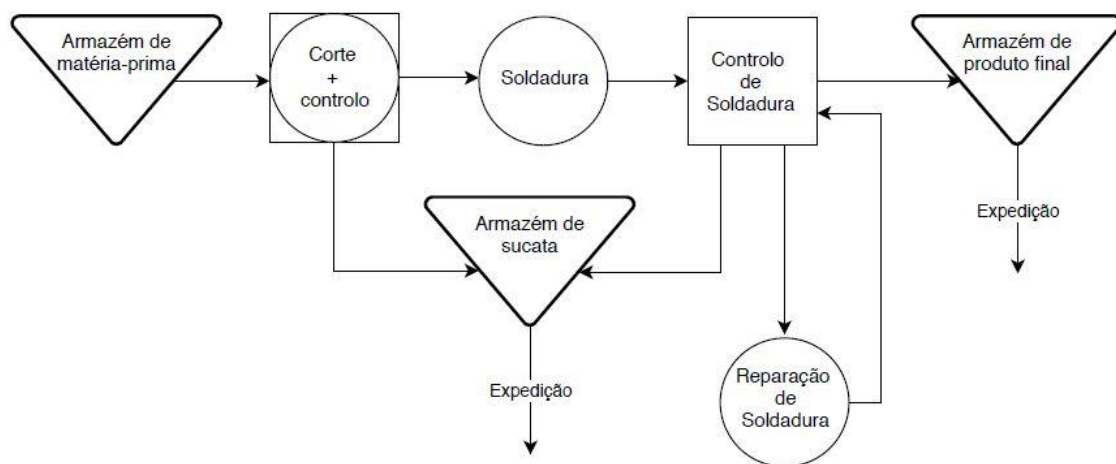


Figura 20 – Exemplo de uma sequência de fabrico (adaptado de [56])

2.3.3.3 Análise de riscos de processo – Failure Mode Effect Analysis (FMEA)

A análise FMEA é um método de gestão que é utilizado para definir, identificar e eliminar falhas possíveis e/ou conhecidas, garantindo a redução de custos e problemas de qualidade, e a maximização da satisfação dos clientes. A correta implementação da FMEA proporciona resultados que trazem benefícios diretos para o negócio, permitindo aumentar o nível de confiança nos produtos e serviços produzidos por uma empresa. A aplicação de uma análise FMEA baseia-se no cumprimento das seguintes diretrizes [57-59]:

- Identificação e definição da área de intervenção;
- Identificação dos modos de falha, das suas causas e consequências;
- Avaliação semiquantitativa dos modos de falha, da possibilidade de ocorrência e de deteção;
- Identificação das recomendações e ações corretivas a aplicar.

As principais vantagens do método FMEA são, como já tem vindo a ser referido, a sua vasta aplicabilidade e a possibilidade de permitir identificar os modos de falha, as suas causas e consequências. Além disto, a aplicação da análise FMEA traduz-se em vantagens como [58, 59]:

- Minimização ou eliminação da ocorrência de erros;
- Evita a necessidade de intervenções não programadas através da identificação dos problemas na análise de projeto;
- Redução dos custos provenientes da resolução de falhas;
- Permite a rastreabilidade dos dados para efeitos de manutenção e auditoria;
- Permite a identificação de falhas críticas para o desenvolvimento de novos produtos, processos ou serviços, fazendo aumentar a viabilidade do sistema.

No entanto, existem também limitações que podem, em certos momentos, complicar a análise, como por exemplo a possibilidade de identificar apenas falhas singulares, não sendo viável a consideração da combinação de falhas, de ser um método moroso e dispendioso e de, em alguns casos, se tornar numa análise complexa dependendo do processo [59].

A correta aplicação da FMEA depende muito do saber distinguir os fatores que se propõem a ser avaliadas como é o caso dos modos potenciais de falha, dos efeitos potenciais da falha, das causas potenciais da falha e dos métodos de deteção e prevenção. O modo de falha é definido como a forma como o processo pode manifestar uma falha. Os efeitos da falha são as consequências das próprias falhas. A causa da falha é definida como a indicação de como a falha pode ocorrer, descrita em termos de que algo pode ser corrigido ou controlado. Os métodos de deteção e prevenção são as ações que devem ser impostas para impedir ou detetar os modos de falha [60].

Como já foi referido, este método possui uma grande aplicabilidade dentro de uma empresa, podendo ser utilizado em diferentes áreas como: projeto e produtos, análise de processos e serviços e na área industrial ou administrativa. A análise de processo é uma técnica que tem como finalidade assegurar a avaliação de todo o processo de fabrico, garantindo as vantagens já referidas. A FMEA de um processo deve iniciar-se através do estudo dos riscos associados ao processo a partir, por exemplo, da sequência de fabrico, e deve desenvolver-se segundo as diretrizes descritas anteriormente. Junto com a realização da análise deve ser elaborado um documento que identifique e descreva o procedimento executado [61].

Neste documento, são avaliados três índices relacionados com o modo de falha de um equipamento e com a segurança dos colaboradores, sendo eles:

- **Gravidade do efeito potencial da falha** (Tabela 3) – Avalia a gravidade dos principais efeitos resultantes da falha;
- **Ocorrência das causas potenciais da falha** (Tabela 4) – Avalia a frequência com que podem ocorrer as causas que levam às falhas e aos seus efeitos;
- **Deteção da prevenção da falha** (Tabela 5) – Avalia a probabilidade de detetar a causa e a respetiva falha, antes da mesma ocorrer.

Segundo Moura [61], os índices referidos anteriormente podem ser avaliados de forma semiquantitativa pelas escalas apresentadas nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 3 – Escala de avaliação do índice de gravidade (adaptado de [61])

| Efeito | Critério | Índice de gravidade (G) |
|---------------|---|-------------------------|
| Nenhum | Não existe qualquer efeito sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 1 |
| Muito ligeiro | Existe um efeito muito ligeiro sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 2 |
| Ligeiro | Existe um efeito ligeiro sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 3 |
| Pequeno | Existe um efeito pequeno sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 4 |
| Moderado | Existe um efeito moderado sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 5 |
| Significante | Existe um efeito significativo sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 6 |
| Grande | Existe um efeito grande sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 7 |
| Muito sério | Existe um efeito muito sério sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 8 |
| Perigoso | Existe um efeito perigoso sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| Extremo | Existe um efeito extremo sobre o equipamento e/ou segurança do colaborador. | 10 |
|---------|---|----|

Tabela 4 – Escala de avaliação do índice de ocorrência (adaptado de [61])

| Ocorrência | Critério | Índice de ocorrência (O) |
|-------------|--|--------------------------|
| Improvável | Falha muito improvável. Realização de processo que nunca apresentam falhas – Taxa de ocorrência ≤ 1 em 1500000. | 1 |
| Muito baixa | Realização de processos que apresentam falhas isoladas – Taxa de ocorrência de 1 em 1500000. | 2 |
| Baixa | Realização de processos com ocorrência de poucas falhas – Taxa de ocorrência de 1 em 15000. | 3 |
| Moderada | Realização de processos com ocorrência de falhas ocasionais, mas sem grandes proporções – Taxa de ocorrência de 1 em 2000 (índice 4); 1 em 400 (índice 5); 1 em 80 (índice 6). | 4 – 6 |
| Alta | Realização de processos que apresentam falhas frequentes – Taxa de ocorrência 1 em 20 (índice 7); 1 em 8 (índice 8). | 7 – 8 |
| Muito alta | A falha é quase inevitável – Taxa de ocorrência de 1 em 3 (índice 9); ≥ 1 em 2 (índice 10). | 9 – 10 |

Tabela 5 – Escala de avaliação do índice de detecção (adaptado de [61])

| Deteção | Critério | Índice de detecção (D) |
|--------------------|--|------------------------|
| Quase certa | O controlo vai detetar certamente o modo de falha. | 1 |
| Muito alta | Há uma probabilidade muito alta do controlo detetar o modo de falha. | 2 |
| Alta | Há uma probabilidade alta do controlo detetar o modo de falha. | 3 |
| Moderadamente alta | Há uma probabilidade moderadamente alta do controlo detetar o modo de falha. | 4 |
| Moderada | Há uma probabilidade moderada do controlo detetar o modo de falha. | 5 |
| Baixa | Há uma probabilidade baixa do controlo detetar o modo de falha. | 6 |
| Muito baixa | Há uma probabilidade muito baixa do controlo detetar o modo de falha. | 7 |
| Remota | Há uma probabilidade remota do controlo detetar o modo de falha. | 8 |
| Muito remota | Há uma probabilidade muito remota do controlo detetar o modo de falha. | 9 |
| Quase impossível | Não é conhecido um controlo para detetar o modo de falha. | 10 |

Além dos índices apresentados, existe um fator que avalia a forma como devem ser priorizadas as falhas do processo, denominado de número de prioridade de risco (NPR). Este fator é calculado através do produto dos índices de gravidade, ocorrência e detecção (Equação 1). O NPR pode variar numa escala numérica entre 1 e 1000 sendo que, quanto mais alto for o seu valor, maior deverá ser a concentração de esforços a fim de minimizar ou eliminar a falha correspondente. No entanto, independentemente do NPR calculado, todas as falhas com um índice de gravidade elevado também devem ser priorizadas.

$$NPR = G \times O \times D \text{ (Equação 1)}$$

2.3.4 Processos de fabrico

No setor de atividade do fabrico, o desenvolvimento do corte, furação e soldadura de chapas e perfis permitiram uma redução do tempo de fabrico, aumento da qualidade e redução dos custos de produção. Nos próximos subcapítulos serão apresentados alguns tipos de processos de corte e soldadura que podem ser utilizados no fabrico de estruturas metálicas [62].

2.3.4.1 Processos térmicos de corte e furação

Os processos de corte térmico estão, geralmente, associados aos processos de soldadura correspondentes, isto porque os equipamentos e os métodos são idênticos para os dois processos. Alguns dos processos de corte térmico mais conhecidos são o oxicorte, corte por plasma e o corte a laser. O corte térmico utiliza uma fonte de energia capaz de produzir uma quantidade elevada de calor capaz de seccionar e/ou furar um determinado material. A qualidade da superfície resultante do corte é satisfatória para o efeito e os métodos são fáceis de mecanizar. Este processo é amplamente utilizado para a preparação de peças para soldadura e para o corte de chapa. [63]. Os processos de corte térmico podem classificar-se segundo o princípio em que se baseiam [64]:

- Baseado na oxidação e combustão do ferro no seio do oxigênio (Oxicorte);
- Baseado na fusão localizada do material e ejeção do material fundido (Plasma e Laser).

- **Processo de oxicorte**

O processo de oxicorte remove material pela reação química, a elevadas temperaturas, do oxigênio com o material a ser cortado. No caso dos materiais resistentes à oxidação, a reação é auxiliada pela adição de fluxos químicos ou de pó metálicos para ajudar no processo de corte. O oxicorte utiliza uma tocha (Figura 21) que tem as funções de fornecer e misturar o gás combustível com o oxigênio, nas porções corretas, para produzir as chamas de pré-aquecimento, e fornecer um fluxo concentrado e puro de oxigênio à zona de reação. A chama produzida na tocha, em primeiro lugar, pré-aquece a zona de corte até à temperatura em que o metal reage com o oxigênio. Em seguida, o fluxo concentrado e puro de oxigênio oxida rapidamente o material, iniciando-se o corte. A escória resultante deste processo encontra-se no estado líquido e é expelida da junta através do jato de gás [63, 65]. O processo de oxicorte é dos mais simples e económicos para cortar aços ao carbono com espessuras compreendidas entre os 3 mm e os 300 mm, no entanto, com recurso a equipamento especial pode cortar-se espessuras até 2000 mm [64].

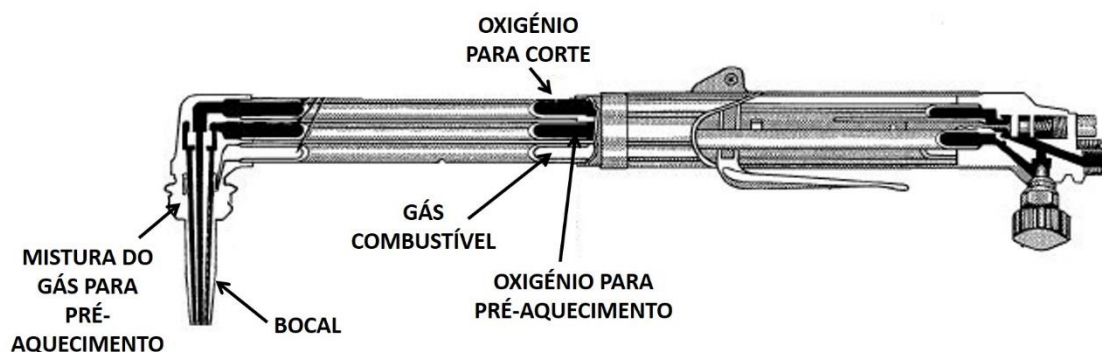


Figura 21 – Esquema da tocha para o processo de oxicorte (adaptado de [65])

- **Corte por plasma**

O processo de corte por plasma (Figura 22) utiliza um arco constrito para derreter uma área localizada da peça, removendo o material fundido através de um jato de alta velocidade de gás ionizado. Este processo é capaz de cortar espessuras até 50 mm e pode chegar até os 150 mm dependendo do material. O corte por plasma não necessita de pré-aquecer o material, o que é particularmente vantajoso em aplicações que envolvam a interrupção do corte. Este processo tem uma vasta aplicabilidade, embora a sua utilização tenha mais interesse em materiais como o aço inoxidável, alumínio e cobre, que não podem ser cortados através do oxicorte. Além disto, o corte por plasma opera em níveis energéticos mais elevados, resultando em velocidades de corte superiores e consequentemente numa zona termicamente afetada menor. Numa variante deste processo, o material pode ser cortado debaixo de água proporcionando um corte sem oxidação a grande velocidade. Comparativamente com o processo convencional, é possível eliminar os fumos e a radiação ultravioleta provenientes do corte, diminuir as deformações do material e reduzir o ruído provocado durante o processo [63-65].

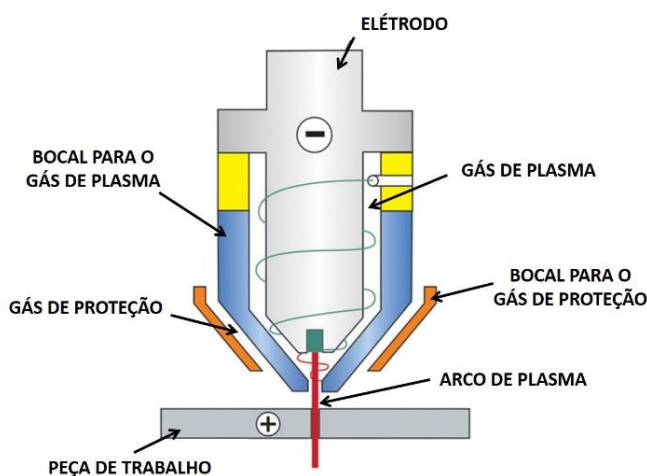


Figura 22 – Esquema do processo de corte por plasma (adaptado de [66])

- **Corte por laser**

O laser é um sistema que produz um feixe de luz monocromática altamente concentrado e coerente (as ondas do feixe estão em fase e orientadas com a mesma direção) [64]. O processo de corte por laser faz a divisão do material através da sua fusão ou vaporização com a energia libertada pelo laser. A remoção do material da junta de corte é forçada por um jato de gás. Com recurso a uma lente, é possível focalizar o laser num ponto de 0,05 a 0,25 mm de diâmetro na peça de trabalho. A focalização do feixe permite aumentar a concentração de energia no mesmo ponto, facilitando o processo de corte. A Figura 23 ilustra o esquema de uma tocha utilizada no corte por laser. O feixe laser produz excelentes características de corte, em particular, uma boa precisão, cortes retos e limpos, baixa perda de material na junta de corte (produz um corte estreito), com uma zona termicamente afetada pequena, superfície de corte livre de rebarbas, baixa distorção da peça e elevadas velocidades de corte. O corte por laser é um processo facilmente automatizado, pode cortar a maioria dos materiais sem haver desgaste das ferramentas envolvidas e, geralmente, não são necessárias operações de acabamento [63, 65].

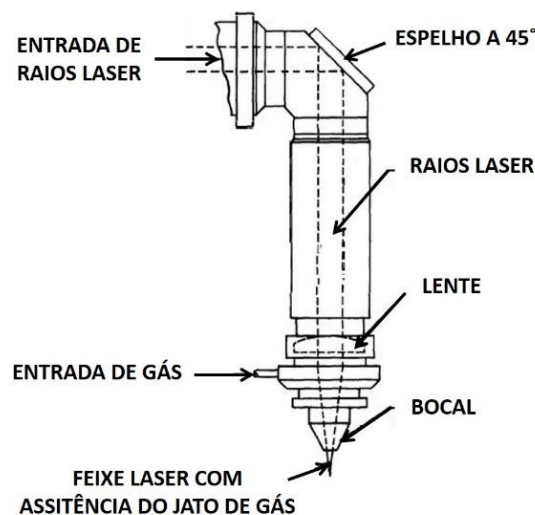


Figura 23 – Esquema da tocha para o processo de corte por laser (adaptado de [65])

2.3.4.2 Processos de soldadura

Como já foi referido no subcapítulo 2.1.5.1, no fabrico de estruturas metálicas é recomendada a soldadura por arco elétrico. Este tipo de soldadura é muito utilizado porque é um meio prático de gerar energia. O arco elétrico transforma a energia elétrica em calorífica, transmitindo-a de seguida através da projeção do arco sobre a peça. Neste tipo de soldadura é importante garantir que o calor fornecido pelo arco se processe a uma taxa bastante superior à de dissipação do mesmo, de forma a produzir o efeito

pretendido de fusão dos materiais de base e adição [17]. Alguns dos processos de soldadura por arco elétrico mais comuns no fabrico de estruturas metálicas são [16]:

- Soldadura por eletrodo revestido;
- Soldadura MIG-MAG (*metal inert gas – metal active gas*);
- Soldadura por arco submerso;
- Soldadura de pernos (*stud welding*).

- **Soldadura por eletrodo revestido**

O processo de soldadura baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre o eletrodo e o material de base, promovendo a formação de um arco elétrico responsável pelo fornecimento de energia sob a forma de calor ao sistema. É através da transferência deste calor que se dá a coalescência dos materiais de base e adição. O material de adição é fornecido em forma de vareta constituída por um núcleo, denominado de alma, e por um revestimento. A alma tem a função de conduzir a corrente elétrica até à ponta do eletrodo e de fornecer o material de adição à junta. O revestimento tem como funções fornecer estabilidade ao arco, proteger o banho de fusão da atmosfera envolvente e conferir à junta propriedades mecânicas, composição química e microestrutura [17, 65].

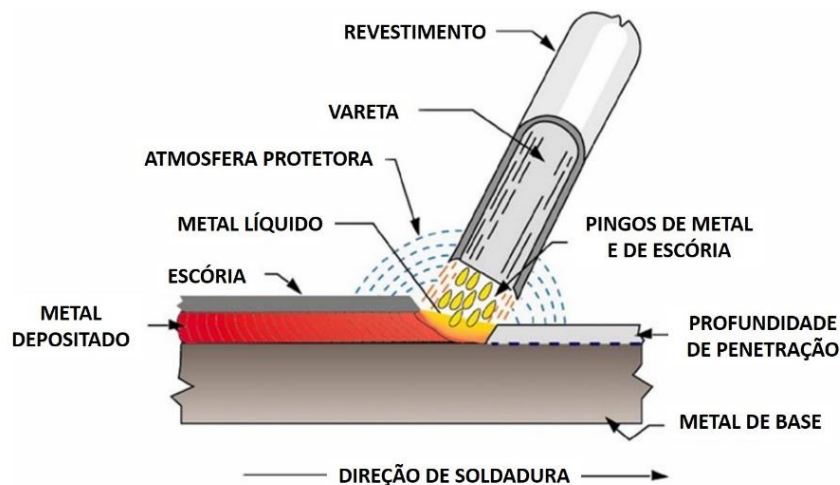


Figura 24 – Esquema de soldadura por eletrodo revestido (adaptado de [17])

- **Soldadura MIG-MAG**

A soldadura MIG-MAG utiliza o arco elétrico como meio energético para promover a coalescência dos materiais de base e adição. A corrente elétrica é conduzida até à junta através de um fio de eletrodo, e todos os processos desenvolvidos entre a tocha e o material de base são protegidos por um fluxo de gás que poderá ser inerte (MIG) ou ativo (MAG). A tocha (Figura 25) é o acessório responsável pela alimentação automática do fio de metal de adição, pela transmissão de energia elétrica e pela alimentação e

regulação do fluxo gasoso. A soldadura MIG-MAG utiliza como material de adição um fio sólido de eletrodo, no entanto, existe uma variante do processo que usa um fio tubular que contém um fluxo no seu interior, responsável por conferir estabilidade ao arco e as propriedades mecânicas do cordão de soldadura. Quando a tocha é manipulada pelos operadores, o processo diz-se semiautomático; quando a tocha passa a estar fixa e o material de movimento de forma automática, ou quando a tocha se movimenta de forma automática sobre o material a soldar, o processo diz-se automático [17, 65].

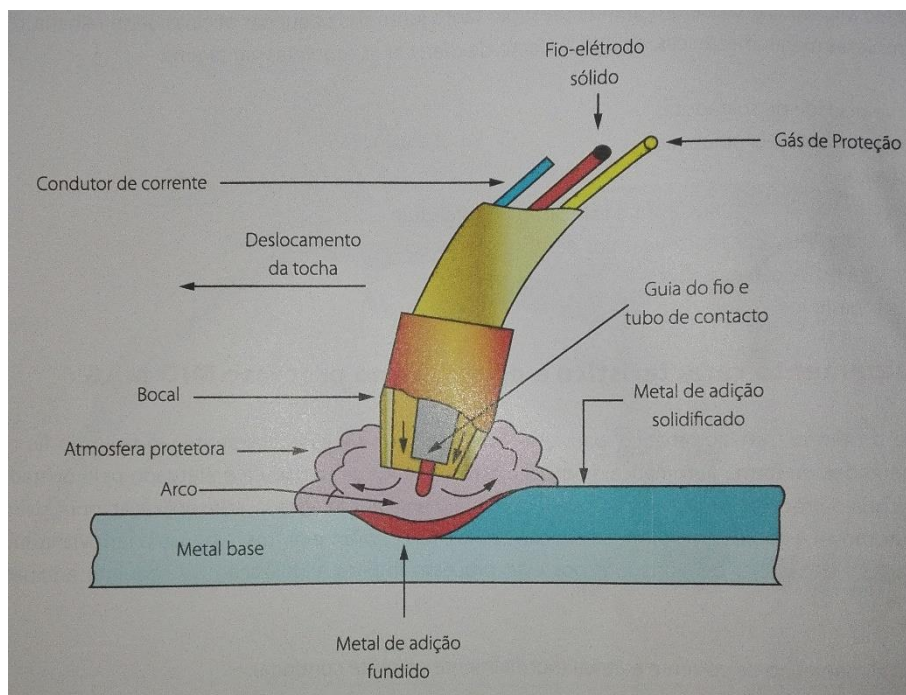


Figura 25 – Esquema de soldadura MIG-MAG [17]

- **Soldadura por arco-submerso**

A soldadura por arco submerso (Figura 26) é um processo automático que, tal como na soldadura MIG-MAG, utiliza como material de adição um fio de eletrodo sólido, que também é responsável por transportar a energia elétrica necessária para formar o arco elétrico. A principal diferença deste processo é que o banho de fusão e o arco elétrico são envolvidos por um fluxo de granulado fusível. A possibilidade de utilização de diferentes fluxos permite ao operador controlar a estabilidade do arco elétrico, as propriedades físicas e mecânicas do cordão de soldadura e a qualidade do processo, dependendo da forma como o fluxo é manuseado. Neste processo, o banho de fusão é constituído pelo material de base, de adição e por parte do fluxo granulado, que fica a proteger o banho da oxidação. O granulado que não é fundido é recuperado, voltando a entrar no sistema de alimentação [17, 65].

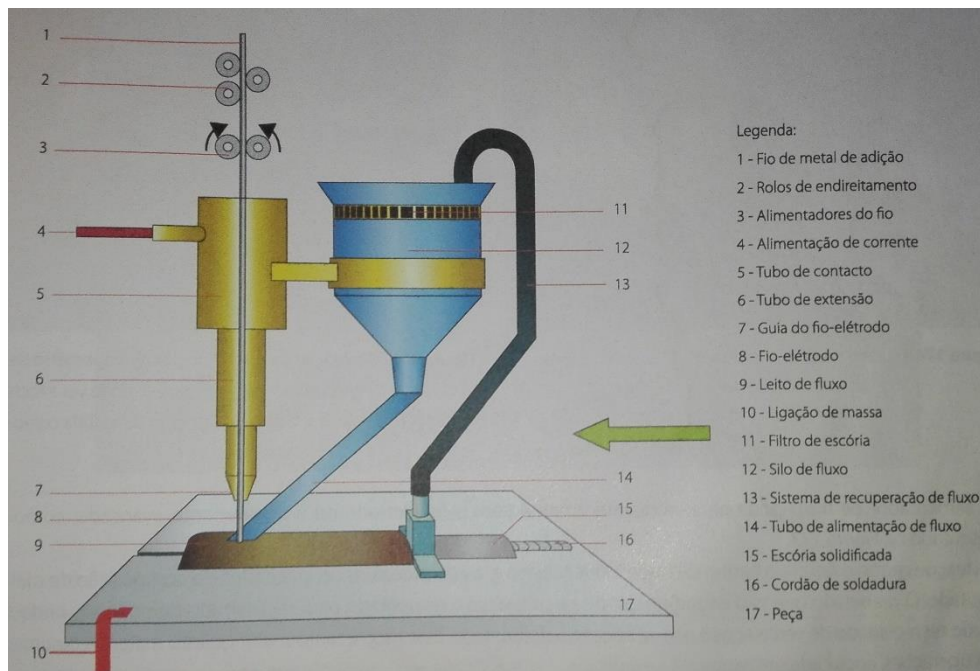


Figura 26 – Esquema de soldadura por arco-submerso [17]

- **Soldadura de pernos (*stud welding*)**

A soldadura de pernos é muito utilizada em construções de aço-betão onde é necessário soldar os conetores que fazem a ligação entre os dois materiais. A realização da soldadura é feita através de um equipamento denominado pistola de soldadura, e que permite soldar a extremidade do perno a uma superfície. O perno, na extremidade a soldar, é protegido por um anel de cerâmica responsável por conter o banho de fuão e proteger o arco elétrico. Com a pistola de soldadura (Figura 27) deve-se pressionar o perno contra a superfície a soldar, no momento em que se pressiona o gatilho da pistola é permitida a passagem de corrente elétrica e o perno é afastado automaticamente da superfície para estabelecer o arco elétrico. O calor resultante do arco derrete a extremidade a soldar do pino e a superfície onde este será soldado, formando o banho de fusão. Por fim, o pino é novamente pressionado contra a superfície, produzindo um cordão de canto à volta do pino em menos de um segundo [16, 65].

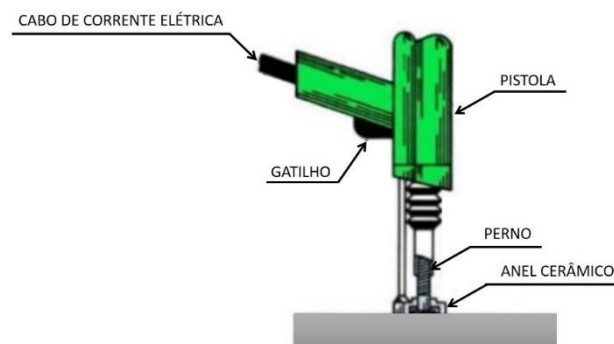


Figura 27 – Esquema de soldadura de pernos (adaptado de [67])

2.3.4.3 Tratamento anticorrosivo

O aço, quando não é devidamente protegido e está em contacto com a atmosfera, a água ou o solo, está sujeito a sofrer corrosão, pelo que se torna importante aplicar ao material um tratamento anticorrosivo. Dada a distinção entre os mecanismos de corrosão nos materiais, bem como a velocidade a que ocorrem, é habitual dividir o ambiente corrosivo em três categorias principais [68]:

- Exposição atmosférica;
- Exposição em água;
- Exposição ao solo.

A seleção do sistema de pintura correto para a proteção anticorrosiva de estruturas metálicas requer a consideração de uma variedade de fatores, de forma a assegurar que do ponto de vista técnico e económico seja encontrada a melhor solução. Para qualquer projeto, os fatores que se devem considerar, antes da seleção dos produtos a aplicar, são [69]:

- **Corrosão ambiental:** é fundamental apurar corretamente as condições a que a estrutura vai estar sujeita no seu ciclo de vida;
- **Tipo de superfície a proteger:** é importante conhecer o material da estrutura em questão, pois a preparação da superfície, os produtos e a espessura de tinta a aplicar dependerão principalmente do material que se pretende proteger;
- **Durabilidade pretendida:** considera-se o tempo de vida esperado de um sistema de pintura o período que medeia entre a aplicação e a verificação da necessidade de uma intervenção de repintura da estrutura;
- **Planeamento do processo de aplicação:** a definição do cronograma das várias fases de construção da estrutura determina como e quando deverá ser aplicado o sistema de pintura. É importante planejar os trabalhos de maneira a que a proteção das superfícies, as condições da atmosfera envolvente e o tempo de secagem sejam o mais idêntico quanto possível nas diferentes fases da construção, caso existam.

2.3.5 Controlo de qualidade

O controlo de qualidade é o conjunto de atividades que têm em vista garantir os níveis de qualidade requeridos para um determinado produto, e é essencial para a melhoria de qualquer processo de fabrico. A implementação deste controlo incentiva os trabalhadores para terem uma maior consciência para a produção de peças de qualidade através da utilização eficaz dos recursos disponíveis [70]. De forma consciente, uma empresa deve demonstrar a sua aptidão para garantir a qualidade do

produto a que se propôs fabricar. A constante melhoria do controlo de qualidade deve ser assegurada pela:

- Determinação dos processos adequados e pela sua implementação;
- Determinação da sequência e interação dos processos;
- Determinação dos critérios e métodos necessários para garantir a qualidade dos processos;
- Disponibilidade dos recursos e informações necessários para dar suporte e monitorização dos processos.

Na eventualidade de uma empresa recorrer a um subcontratado para a execução de parte ou todo o processo, esta deve assegurar o controlo de qualidade sobre o mesmo. Informações relativas à qualidade de um produto devem estar identificadas no planeamento de fabrico. Qualquer alteração que possa ocorrer é da responsabilidade dos intervenientes responsáveis assegurar a revisão do planeamento e consciencializar os colaboradores responsáveis pelo fabrico dessas alterações. Relativamente à gestão de recursos, uma empresa deve garantir que os seus colaboradores são qualificados para desempenhar os processos e assegurar o espaço de trabalho, equipamentos e serviços de apoio necessários [71].

O plano de inspeção e ensaio (PIE) é um documento importante no que diz respeito ao controlo de qualidade. No PIE são enumeradas todas as inspeções e ensaios a efetuar, os procedimentos a seguir, as normas aplicáveis, os critérios de aceitação, os responsáveis pela execução e inspeção, e os documentos que devem ser emitidos por cada inspeção ou ensaio [72].

2.3.5.1 Controlo dimensional

O controlo dimensional é um método de verificação das características geométricas de peças, estruturas e equipamentos. O seu principal objetivo é garantir a correta montagem, bom funcionamento e, se necessário, a substituição dos elementos de um conjunto, através da identificação das não-conformidades dos desvios geométricos [73]. Segundo a norma EN 1090-2 [74], existem dois tipos de tolerâncias geométricas que definem os desvios permitidos:

- **Tolerâncias essenciais:** são aplicadas para uma série de critérios que são essenciais para a resistência mecânica e estabilidade da estrutura (Anexo D.1 da EN 1090-2);
- **Tolerâncias funcionais:** são aplicadas a critérios como o ajustamento e a aparência. Neste caso, os desvios devem estar em conformidade com os valores tabelados (Anexo D.2 da EN 1090-2) ou de acordo com os critérios alternativos (EN ISO 13920).

2.3.5.2 Controlo de soldadura

O controlo de soldadura pretende minimizar os riscos de falha referentes às juntas soldadas. O grau de controlo a aplicar depende da qualidade exigida para a construção em específico. A qualidade deve ser incorporada na fase de fabrico, não podendo ser garantida apenas pelo controlo e inspeção final. Os processos de soldadura têm uma influência muito grande no custo final da obra, bem como na qualidade final do produto [75, 76]. Devido à sua importância é necessário garantir a qualificação dos procedimentos de soldadura, assegurando e demonstrando que um processo é adequado para preencher os requisitos de qualidade definidos para a estrutura [77]. Para isso, é necessário definir as especificações dos procedimentos de soldadura a fim de obter um plano das operações para a sua execução e respetivo controlo de qualidade. É importante perceber que a definição das especificações de soldadura fornecem uma base sólida para cumprir as exigências requeridas, no entanto estas não são suficientes. Algumas imperfeições e distorções poderão surgir durante a realização da soldadura e, por isso, devem utilizar-se ensaios não destrutivos no produto final para garantir o cumprimento dos requisitos de qualidade. No anexo A da norma prEN ISO 15607:2003 [78] são identificadas as normas necessárias para definir as especificações e garantir a qualificação dos processos de soldadura.

Para se iniciar o fabrico de uma estrutura que envolva processos de soldadura, além dos respetivos desenhos e listas, é necessário ter também um documento denominado de *Welding Procedure Specification* (WPS). Este documento providencia toda a informação necessária para executar uma soldadura. A qualificação deste documento deve ser realizada através do diagrama presente na Figura 28, enquanto o seu preenchimento deve seguir os pontos descritos na norma EN ISO 15609-1:2004, para soldadura por arco elétrico [78].

Grande parte das estruturas metálicas em construção soldada, para além da qualificação das especificações de soldadura, exige também a certificação dos soldadores que executam as operações de acordo com as WPS. A qualificação de soldadores é necessária para garantir que determinada pessoa é capaz de cumprir os requisitos e realizar a operação de soldadura no âmbito da norma aplicável. Para isso, os soldadores necessitam de demonstrar a sua habilidade em produzir uma junta soldada de acordo com os padrões necessários. O processo de qualificação de soldadores deve ser supervisionado por uma entidade autorizada para o efeito, que depois é responsável por efetuar os ensaios necessários à junta e emitir o certificado de qualificação ao soldador, no caso de um resultado positivo nos ensaios [79, 80].

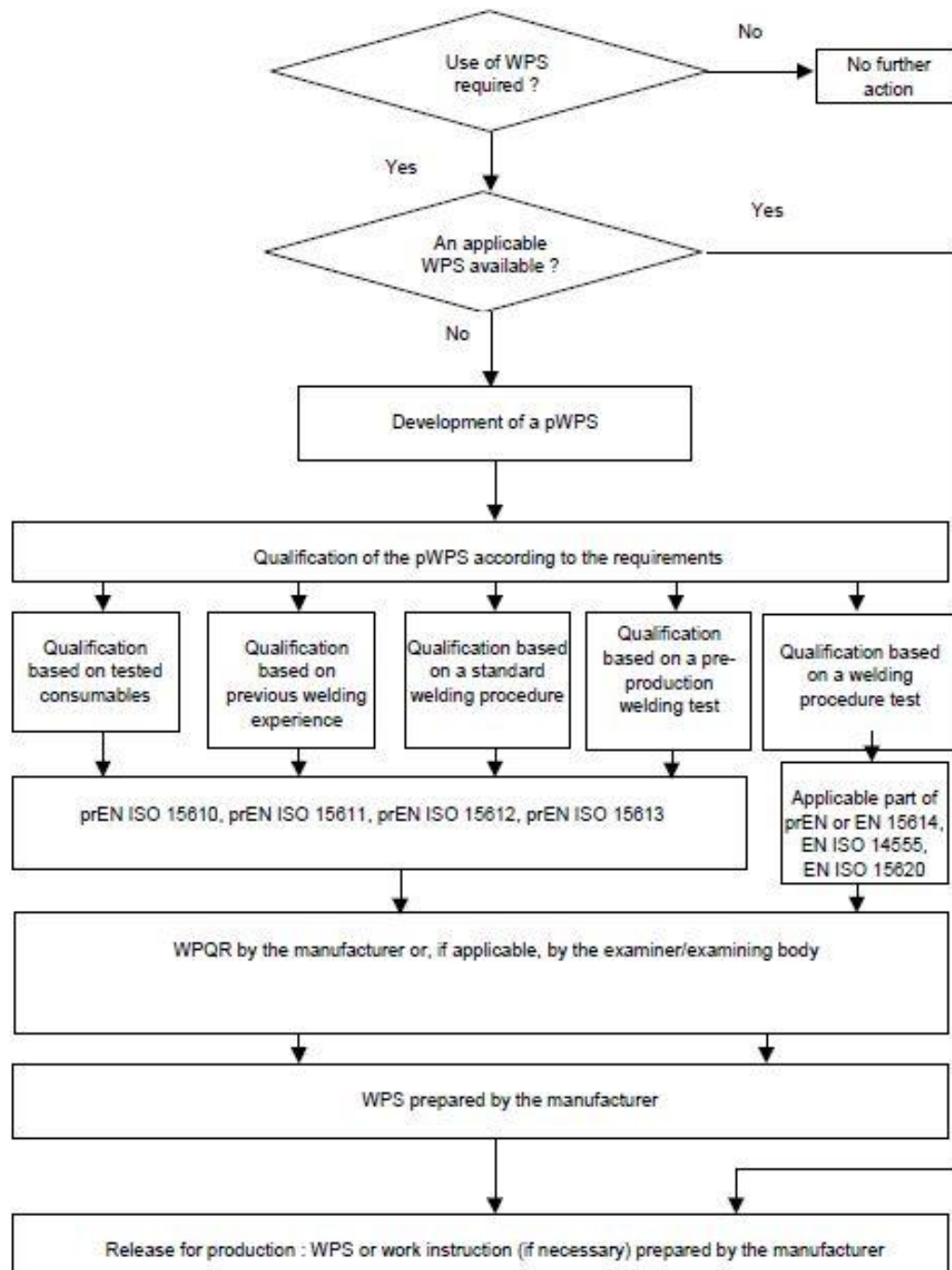


Figura 28 – Processo de qualificação de uma WPS [78]

Um cordão de soldadura deve ter a qualidade adequada para garantir as suas funcionalidades ao longo da sua vida útil. O caderno de encargos de uma obra ou as normas aplicáveis devem definir o nível de qualidade requerido para cada projeto [81]. O plano de inspeção, no que diz respeito à soldadura, pode ser efetuado a 100% dos produtos ou então em algumas amostras. Através da realização de uma seleção

representativa da produção para efeitos de inspeção é possível extrair conclusões válidas que podem ser extrapoladas ao resto da produção do mesmo lote [79].

Para a análise de estruturas metálicas são utilizados métodos não-destrutivos, cada um com as suas vantagens e limitações. Ensaio não-destrutivo é um termo utilizado para identificar uma inspeção realizada a um produto sem o danificar ou destruir. Para a análise da integridade da soldadura em estruturas metálicas, podem ser utilizados os cinco principais ensaios não-destrutivos [81]:

- **Ensaio de inspeção visual:** é o ensaio não-destrutivo mais simples e económico, e considerado um dos mais importantes pois permite, com o decorrer do processo de soldadura, verificar o cumprimento das especificações descritas na WPS. Apesar de estar limitada à avaliação de descontinuidades na superfície do cordão de soldadura, a inspeção visual deve ser o primeiro método de análise da qualidade de elementos soldados, permitindo observar sinais de porosidade, inclusões e fissuração. A confirmação destes defeitos é realizada posteriormente com recurso a ensaios não-destrutivos mais sofisticados, como os descritos nos pontos seguintes. A realização do ensaio de inspeção visual pode ser realizada com recurso a equipamentos como luzes auxiliares, lupas e equipamentos de medição;
- **Ensaio de líquidos penetrantes:** é um ensaio que revela as descontinuidades na superfície do cordão de soldadura através da penetração de um líquido que se introduz por capilaridade, baixa tensão superficial e grande capacidade de molhar uma superfície. Este método é um complemento do ensaio de inspeção visual pois é capaz de revelar defeitos que não são visíveis a olho nu. A aplicação do ensaio de líquidos penetrantes pode ser realizada utilizando dois métodos que diferem no tipo de líquido penetrante. Um método utiliza um líquido fluorescente que revela as descontinuidades com recurso, por exemplo, a uma luz ultravioleta. O segundo método utiliza um líquido penetrante visível, geralmente de cor vermelha, que revela as descontinuidades através do contraste com um líquido revelador de cor branca;
- **Ensaio de partículas magnéticas:** O ensaio de partículas magnéticas utiliza a alteração do fluxo magnético quando é estabelecido o campo magnético na vizinhança de uma descontinuidade. A alteração deste fluxo é revelada pelo aparecimento de um padrão diferente, desenhado pelos pós metálicos quando aplicados a uma superfície, devido à descontinuidade existente no material. Para estruturas metálicas, o ensaio de partículas magnéticas é mais efetivo e preferível do que o ensaio de líquidos penetrantes. É um ensaio muito eficaz para localizar fissuras, inclusões e poros na superfície e ligeiramente abaixo desta. Apesar disto, o seu melhor uso é empregue quando é utilizado como um método complementar ao ensaio de inspeção visual. As descontinuidades podem estar orientadas em qualquer direção. No caso de uma descontinuidade estar

orientada paralelamente às linhas criadas pelo campo magnético esta é praticamente indetetável. Por isso, é necessário efetuar o ensaio de partículas magnéticas pelo menos duas vezes em direções diferentes para obter uma avaliação adequada. As linhas criadas pelo campo magnético devem ser suficientemente fortes para revelar os defeitos no cordão de soldadura, no entanto, não demasiado fortes devido à possibilidade de as discontinuidades serem escondidas;

- **Ensaio de inspeção radiográfica:** Este método de inspeção utiliza raios X ou gama que passam através do material e expõem um filme fotográfico no lado oposto. A inspeção radiográfica assenta na capacidade de um material absorver energia. Todos os materiais apresentam diferentes rácios de absorção. Materiais de espessura fina absorvem menos radiação e, quanto mais elevada for a densidade de um material, maior será a sua capacidade de absorver energia. O filme fotográfico resultante do ensaio é um negativo, onde as regiões negras são as partes mais expostas do material e que absorvem menor quantidade de radiação. As discontinuidades no material serão reveladas no ensaio pelas regiões negras. Por exemplo, a porosidade é revelada como pontos pequenos e negros, as inclusões são apresentadas de forma similar à porosidade, mas com uma geometria irregular e a fissuração é revelada através de linhas negras. No caso das fissuras estarem orientadas perpendicularmente à direção da fonte de radiação, estas podem não ser detetadas por este ensaio. A inspeção radiográfica é mais eficaz na deteção de discontinuidades volumétricas, como as inclusões e as porosidades;
- **Ensaio de ultrassons:** é um método de ensaio que se baseia na transmissão de ondas de som de alta frequência através dos materiais. As ondas sonoras são emitidas para a peça por um transmissor e lidas por um recetor na parte posterior da mesma. Em materiais sólidos e sem discontinuidades, as ondas sonoras são transmitidas na peça de forma interrupta. Numa peça que apresente alguma discontinuidade o recetor vai ler um sinal intermédio. O ensaio de ultrassons pode ser utilizado para detetar fissuras, mordeduras, poros, inclusões, fusão incompleta, falta de penetração, entre outras discontinuidades. Através da aplicação de técnica apropriada, é possível saber, de forma aproximada, a localização, profundidade e o tamanho das discontinuidades detetadas. A inspeção por ultrassons tem sensibilidade suficiente para detetar discontinuidades que não são prejudiciais ao desempenho da junta soldada.

2.3.5.3 *Controlo de pintura*

O aço sem qualquer tipo de proteção, quando exposto à atmosfera, à água e o solo, é sujeito ao fenómeno de corrosão, que danifica o material. De forma a evitar esta situação, as estruturas metálicas são, normalmente, protegidas contra a corrosão durante o seu período de serviço [82]. Seguindo o mesmo conceito da qualidade, para se obter um tratamento anticorrosivo eficaz é necessário garantir a qualidade de todos os produtos e das operações essenciais à realização do processo. O desempenho dos revestimentos protetores é afetado significativamente pelo estado da superfície do material no momento da aplicação. A preparação da superfície é importante para obter uma área limpa, homogénea, sem meios de oxidação e aderente, ou seja, com a rugosidade correta para a aplicação dos revestimentos. Além disto, existem ainda dois fatores que são igualmente prejudiciais ao desempenho de um revestimento anticorrosivo, sendo eles [83]:

- A presença de elementos que provoquem a oxidação do material;
- A presença de contaminantes como poeiras e óleos.

De forma a combater os fatores apresentados anteriormente, é importante assegurar os seguintes aspetos, de modo a garantir a qualidade exigida ao produto [84]:

- Garantir a qualidade dos produtos a aplicar;
- Assegurar uma boa preparação da superfície;
- Respeitar as condições e especificações do sistema de pintura a aplicar;
- Controlar as condições ambientais de aplicação;
- Efetuar os ensaios necessários à pintura.

Dependendo do sistema de pintura que se pretende aplicar, do meio ambiente a que o produto vai estar sujeito, à durabilidade pretendida para o revestimento, das limitações económicas, entre outros fatores, pode-se optar por diferentes tipos de preparação de superfície. A norma EN 12944-4 [85] especifica três métodos de limpeza, sendo eles: métodos por ação mecânica (Figura 29), métodos de limpeza com água, solventes e químicos e limpeza por chama.



Figura 29 – Superfície decapada por jato abrasivo [86]

Para a proteção de estruturas metálicas contra a corrosão, muitos sistemas de pintura podem ser utilizados, dependendo da classificação atribuída ao ambiente envolvente. O anexo A da norma EN 12944-5 [82] apresenta uma lista de sistemas de pintura que podem ser aplicados. No entanto, muitos outros sistemas similares estão disponíveis, não sendo os presentes na norma de utilização obrigatória. Muitos fatores têm influência direta sobre o processo de degradação de um sistema de pintura, e que não conseguem ser controlados em laboratório da forma natural como ocorrem. Por isso, torna-se difícil ter uma classificação confiável sobre os sistemas de pintura. Para contrariar isto, apesar do tempo necessário, é recomendada a execução de um ensaio de exposição natural ao revestimento, para a obtenção de resultados mais fiáveis [87]. A Figura 30 apresenta, de uma forma geral, a aplicação de um sistema de pintura.

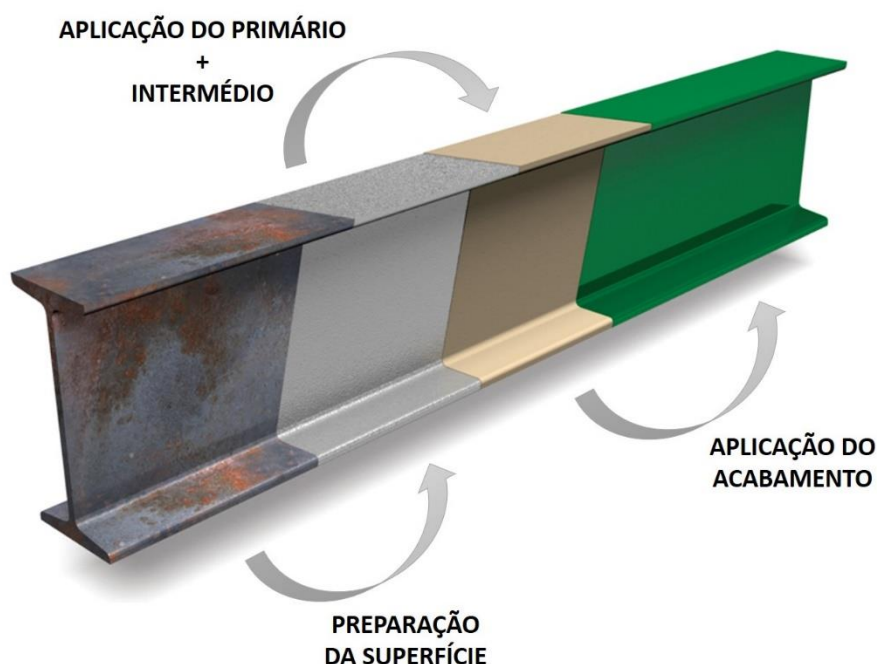


Figura 30 – Sistema geral de pintura (adaptado de [88])

Como forma de garantir a qualidade da aplicação do sistema de pintura, podem e devem ser executados ensaios que permitam avaliar o desempenho do revestimento. Existem dois ensaios bastante simples que podem ser utilizados para o efeito descrito anteriormente: um permite estimar a durabilidade do revestimento (ensaio *pull-off*) e o outro verificar se a espessura de tinta está de acordo com o pretendido (ensaio de determinação da espessura de filme).

- **Ensaio *Pull-Off***

O ensaio *pull-off* (Figura 31) tem como objetivo determinar a aderência de um sistema de pintura através de um ensaio de tração realizado à camada de tinta. Este teste é útil pois permite a comparação do comportamento de adesão de diferentes revestimentos. Existem várias formas de efetuar este ensaio, no entanto todas elas se baseiam no

mesmo princípio. Após a aplicação e cura do revestimento, é colocado um *dolly* na superfície a testar e preso através da cura de um adesivo. Em seguida, o conjunto é colocado num aparelho de tração adequado ao ensaio e submetido ao teste, com os fatores intervenientes bem controlados, até ocorrer a rotura da ligação do revestimento. Deste ensaio obtém-se a tensão de tração necessária para quebrar a ligação na interface (rotura adesiva) ou componente (rotura coesiva). Além disto, há a possibilidade de ocorrer rotura mista (rotura adesiva e coesiva) [89].

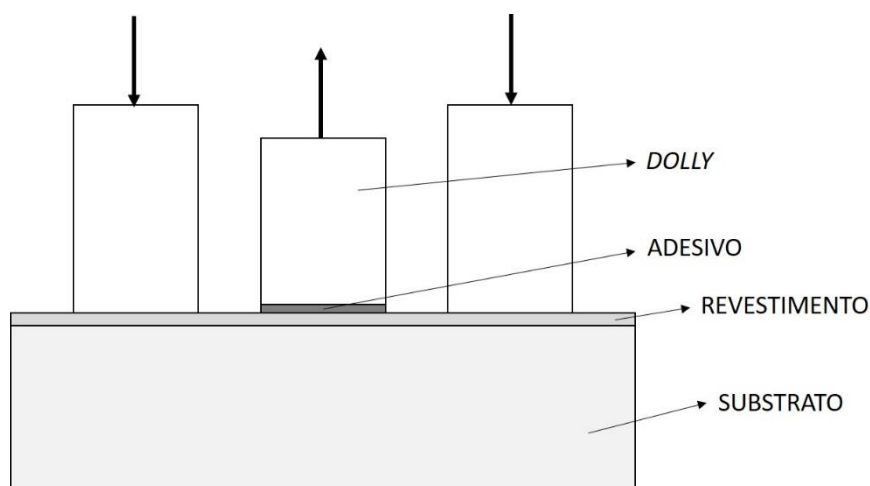


Figura 31 – Esquema do ensaio *pull-off* (adaptado de [89])

- **Ensaio de determinação da espessura de filme**

Este ensaio, tal como o nome indica, pretende determinar a espessura de filme aplicada numa dada superfície. A norma ISO 2808 [90] especifica três situações distintas para a aplicação deste teste:

- Determinação da espessura de filme húmido (Figura 32) – este ensaio é aplicado em qualquer tinta húmida e que ainda se apresente no estado líquido. É aconselhável a sua execução à medida que é aplicado o revestimento para garantir uma medição representativa do filme húmido. Este ensaio permite que o operador responsável pela tarefa consiga ajustar a velocidade da operação, o número de passagens necessárias e o bocal ideal para o pulverizador de forma a aplicar a quantidade correta de revestimento. Desta forma, é possível obter a espessura de filme seco requerida. A medição da espessura de filme húmido é muitas vezes considerada uma ferramenta de ajuda à aplicação do revestimento ao invés de um ensaio de inspeção [91];

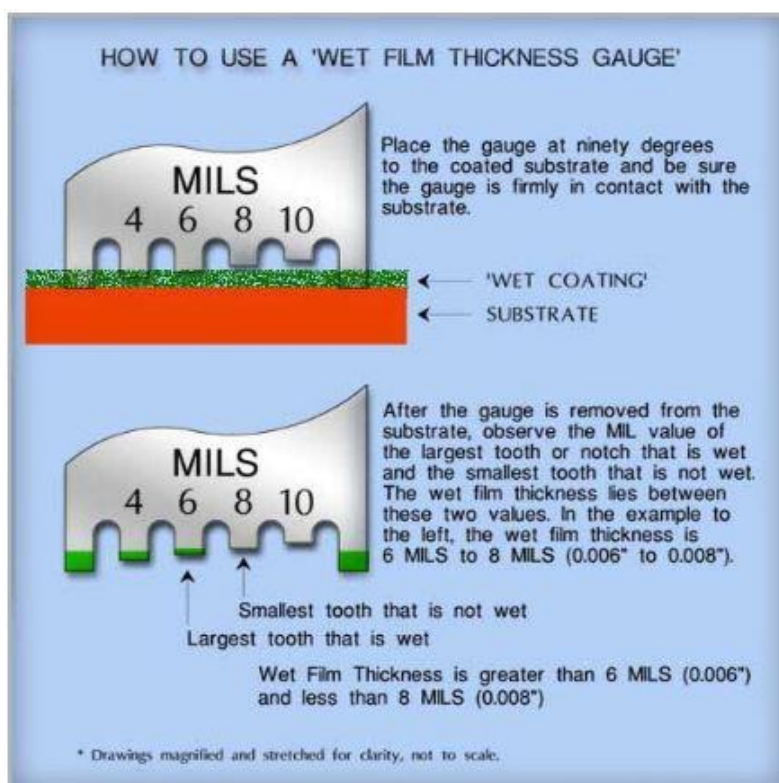


Figura 32 – Aplicação do método de determinação da espessura de filme húmido [91]

- Determinação da espessura de filme seco (Figura 33) – este é muito provavelmente o ensaio mais importante realizado na inspeção de qualidade de um revestimento. Até mesmo a especificação mais básica de aplicação irá requerer a realização deste ensaio. A importância da medição da espessura de filme seco deve-se ao facto de ser possível determinar a durabilidade do sistema de pintura aplicado [92];



Figura 33 – Aplicação do método de determinação da espessura de filme seco [93]

- Determinação da espessura de filme pré-curado – neste ensaio a espessura do revestimento é medida num estado de pré-cura, com o objetivo de prever a espessura de revestimento curado. Para isso, é necessário conhecer-se o nível de contração do revestimento e a densidade e tamanho das partículas que o constituem. Para a determinação da espessura de revestimento pré-curado são utilizadas técnicas destrutivas e que podem exigir a recomposição da pintura. A aplicação deste método deve-se ao facto de, no caso de um revestimento ser aplicado incorretamente, a sua correção após a cura total requer um custo e trabalho acrescido, e pode também levar à contaminação do revestimento, causando problemas de aderência e integridade na pintura já aplicada. Com a utilização deste método há a possibilidade de intervenção imediata por parte do operador [94, 95].

2.3.6 Transporte de materiais e equipamentos

A maneira mais viável e simples de fabrico de estruturas é no próprio local da obra, no entanto, a situação mais comum é a utilização de transportes para levar a carga desde o local de fabrico até à obra. No decorrer do processo de fabrico, os materiais também são movimentados dentro da oficina entre os diferentes setores. Dependendo da escolha do transporte, existem limitações relativas à carga que está associada a cada tipo de transporte, como os pesos e dimensões máximas, e volume disponível. A carga e descarga de estruturas e equipamentos é realizada por equipamentos do tipo grua.

O plano de transporte é importante pois permite organizar a forma como a carga é acondicionada e define as prioridades de expedição, evitando trabalho desnecessário após a descarga das peças e equipamentos no local da obra. O planeamento do transporte numa obra é essencial para a sua realização dentro do prazo estabelecido, sendo os aspetos que têm mais relevância para sua elaboração os seguintes [96]:

- Escolha do meio de transporte;
- Escolha do tipo de veículo em função das limitações dimensionais e capacidade de carga;
- A marcação das datas dos transportes que estão dependentes do número de peças produzidas e que é possível armazenar no local da obra;
- Definição das prioridades de expedição e do acondicionamento da carga em função da sequência de montagem;
- Capacidade de armazenamento da oficina. Caso não seja possível armazenar materiais quer na oficina quer em obra, deve ser criado um ponto de armazenamento entre estes locais, dando preferência a um lugar próximo da obra;

- O acondicionamento da carga deve ser pensado para que os materiais mais leves fiquem por cima dos mais pesados, de forma a não danificar a carga. Entre os materiais devem ser colocados elementos de madeira para garantir proteção à carga e facilitar as operações de carga e descarga;

O transporte de materiais e equipamentos pode ser realizado por meio de transporte rodoviário, ferroviário, marítimo e aéreo. O transporte rodoviário (Figura 34) é um dos mais utilizados e dificilmente os outros meios de transporte não dependerão do rodoviário em algum ponto da movimentação da carga, desde o local de fabrico até à obra. As principais vantagens dos transportes rodoviários são a sua flexibilidade operacional e possibilidade de carregar o veículo dentro da oficina e descarregá-lo a poucos metros do local de montagem em obra. O sistema de transporte rodoviário tem um elevado custo de manutenção e está associado a indústrias leves, onde a movimentação das cargas é realizada de forma rápida e em pequenos lotes [96, 97].



Figura 34 – Transporte rodoviário de mercadorias em contentores [98]

O transporte ferroviário (Figura 35) é tradicionalmente associado a indústrias pesadas onde é necessária uma capacidade de carga elevada. Este tipo de transporte tem uma flexibilidade limitada porque se desloca, única e exclusivamente, sobre carris. O acondicionamento da carga pode ser feito em várias carruagens e o tempo despendido nesta tarefa pode atrasar o transporte. O aspeto económico é o principal fator de análise da viabilidade de utilização deste transporte em detrimento do rodoviário [96, 97].



Figura 35 – Transporte ferroviário de mercadorias [99]

O transporte aéreo (Figura 36) tem uma utilização restrita, dada a fraca capacidade de carga, os elevados custos e a dependência dos aeroportos. Este meio de transporte é indicado para mercadorias leves, pouco volumosas e de grande valor. A grande utilização deste transporte é em situações de emergência, quando há a necessidade de enviar materiais e equipamentos pequenos de forma rápida e sem preocupação com os custos [96, 100].



Figura 36 – Transporte aéreo de mercadorias [101]

O transporte marítimo (Figura 37) apresenta como vantagem a possibilidade de agregar carga em contentores de forma a facilitar as operações de carga e descarga, que de outra forma seriam mais trabalhosas se os elementos estivessem separados. Neste tipo de transporte, a carga e descarga de mercadoria no porto marítimo é da inteira responsabilidade do próprio porto e a execução destas operações dependem da disponibilidade de operadores, equipamentos e espaço no porto marítimo. A análise da viabilidade de utilização deste meio de transporte deve contemplar o tempo de espera para a realização das operações de carga e descarga no porto, os custos portuários e os defeitos que podem surgir nos elementos, nomeadamente empenamento e riscos na pintura [96].



Figura 37 – Transporte marítimo de mercadorias [102]

2.3.7 Montagem da estrutura

O planeamento da montagem de qualquer estrutura em obra deve começar com a sua definição na fase de projeto e concluída na fase de planeamento de fabrico. Como princípios de montagem, uma empresa pretende uma execução rápida do trabalho com o menor custo possível. Para isso, devem-se minimizar os trabalhos em altura e no local da obra, principalmente se estes podem ser realizados em oficina com as condições ideais. As fases de projeto e modelação para fabrico devem ser responsáveis por garantir que a maioria dos trabalhos sejam realizados em oficina e a baixo nível, de forma a economizar tempo e custos em trabalhos que não necessitam de depender do clima e de trabalhos temporários [6].

A montagem de pontes e viadutos estão entre as mais exigentes e complexas em termos operacionais. Os elementos que constituem este tipo de estruturas são, geralmente, muito pesados e o acesso dos equipamentos ao local de montagem é difícil, tornando as operações de montagem bastante complicadas. No que diz respeito a pontes, existe uma variedade de processos de montagem que podem ser aplicados. A escolha do método de montagem deve ter em consideração o tipo de estrutura, comprimento do vão, as condições do local da obra, os equipamentos disponíveis e a forma como o material é entregue em obra. No decorrer do processo de montagem é muito importante assegurar a preservação da integridade da estrutura, visto que, nesta fase, se desenvolvem esforços diferentes daqueles que foram previstos na fase de projeto. Como forma de prevenção da situação anterior, utilizam-se estruturas auxiliares que viabilizam a montagem da estrutura principal. No entanto, o custo destes elementos auxiliares é bastante elevado e cabe à fase de planeamento da montagem padronizá-los de modo a poderem ser utilizados em outras obras [96, 103].

Para a montagem de pontes, os processos apresentados de seguida são possíveis soluções [104]:

- **Montagem por moldação no local** (Figura 38): O processo de montagem por moldação no local é um método apropriado e bastante económico para a construção de pontes em betão e de outras estruturas onde a altura, topografia e condições geotécnicas não possibilitam o uso de cofragens convencionais devido ao seu custo. Este processo consiste em desenvolver a estrutura por segmentos, recorrendo à construção moldada no local. A construção de uma ponte utilizando este método pode iniciar-se, em simultâneo, em todos os pilares e em ambos os sentidos, tornando este método bastante produtivo [104];



Figura 38 – Montagem por moldação no local [104]

- **Montagem por segmentos** (Figura 39): O método de montagem por segmentos oferece uma elevada velocidade de construção. Neste processo, os segmentos são pré-fabricados fora do local de montagem, sendo depois transportados e erguidos para a sua posição final através de um pórtico de elevação que se encontra apoiado nos pilares. Os segmentos são primeiro colocados por ordem no pórtico de elevação e são depois montados no seu local de forma sucessiva e rápida [104, 105];



Figura 39 – Montagem por segmentos [105]

- **Montagem por levantamento** (Figura 40): Este método foi desenvolvido especialmente para levantar grandes cargas através de um sistema hidráulico. É um método que oferece uma solução particularmente oportuna e económica para a construção de estruturas a partir de segmentos pesados, onde as montagens por moldação e segmentos não são as mais recomendadas. Esta técnica pode ainda ser utilizada para levantar pontes e executar a devida manutenção aos apoios e corrigir a posição da estrutura efetuando a sua rotação ou deslizamento [105];



Figura 40 – Montagem por levantamento [104]

- **Montagem através do lançamento incremental** (Figura 41): O processo de lançamento incremental consiste em pré-montar as vigas da ponte no terreno numa das margens e fazer deslizar a ponte inteira sobre apoios rolantes até à sua posição final sobre os pilares. O tabuleiro, normalmente em betão, só é montado após as vigas estarem posicionadas. Para a execução deste processo de montagem é necessário um elemento denominado de “nariz” de lançamento

que é utilizado como prolongamento provisório da ponte e que, em conjunto com os contrapesos colocados na outra extremidade, evitam que a estrutura caia entre os pilares. Qualquer ponte contínua com mais de um vão pode ser lançada sem contrapeso, desde que o peso da estrutura sobre a margem seja muito superior ao peso da estrutura a ser projetada para o pilar. O lançamento incremental de pontes pode economizar tempo e custos, e aumentar a qualidade do acabamento. Embora as vantagens deste processo de montagem sejam significativas, a utilização deste método exige um alto nível de especialização, tanto em termos de colaboradores como de equipamentos [96, 105].



Figura 41 – Montagem por lançamento incremental [105]

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Apresentação da empresa
- 3.2 Caracterização da estrutura
- 3.3 Requisitos do projeto
- 3.4 Gestão do projeto

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Apresentação da empresa

A Metalongo – Metalúrgica de Valongo, SA foi criada em 1980 por um efetivo de 6 colabores e a sua atividade era fundamentalmente relacionada com estruturas ligeiras de cobertura de edifícios industriais, silos e pequenos reservatórios. Em 1989, o pacto social foi alterado, tendo entrado para a sociedade um experiente técnico de metalomecânica que imprimiu uma nova dinâmica às atividades da empresa. A partir deste momento, a empresa dotou-se de meios de produção adequados às novas exigências e criou uma bolsa de clientes altamente rigorosos em termos de qualidade e cumprimento de prazos contratuais. Em 1998, a Metalongo iniciou a sua aposta no mercado de exportação, o que passou a representar uma parte significativa da sua produção anual. Nos últimos 5 anos, as suas exportações representaram entre 75% a 85% da sua produção em que desenvolveu atividades em áreas de negócio relacionadas com cofragens metálicas, pontes, estruturas metálicas de todo o tipo edifícios e execução e requalificação de postos de abastecimento de combustível. Hoje em dia, a empresa continua a conquistar clientes a nível nacional e, em termos internacionais, tem mercado em países como França, Suíça, Brasil, Angola, entre outros. A nível de certificações, a Metalongo é certificada pela TUV na norma EN 1090 com classe de execução EXC3 desde 2015 e pela SGS/TUV na norma ISO 9001 desde 2002 [106]. A Figura 42 apresenta duas obras que contaram com a participação da Metalongo.



Figura 42 – Cofragem de pilar (esquerda); Ponte de Penacova sobre o rio Mondego (direita) (adaptado de [106])

3.2 Caracterização da estrutura

O projeto da ponte sobre o Rio Shire surgiu após a realização de atividades de reabilitação e fortalecimento na ponte já existente sobre o mesmo rio. Um levantamento batimétrico realizado na zona demonstra a existência de um canal de grande profundidade causado pelo fenômeno de erosão desde a construção da ponte original. Como consequência do levantamento realizado, foram efetuados vários estudos de modo a entender a magnitude do fenômeno de erosão e encontrar possíveis métodos de proteção e segurança. Os resultados dos estudos anteriores demonstraram a necessidade de equipamentos especiais e medidas dispendiosas para a realização dos processos de segurança, levando o cliente a optar pela substituição da ponte original.

A nova ponte (Figura 43) é composta por um *deck* formado por duas vigas longitudinais com 2,40 m de altura e várias lajes de betão. A ponte tem um comprimento total de 165 m, divididos em vãos de 50 m + 65 m + 50 m, suportados por dois pilares centrais (P1 e P2) e dois pilares nas margens do rio (A1 e A2). A construção dos pilares será efetuada fora do canal de erosão do rio e em zonas mais profundas, permitindo minimizar a complexidade da execução dos trabalhos. Como solução construtiva foi adotado o método de lançamento incremental devido às condições locais, nomeadamente, a largura e o fluxo do rio.

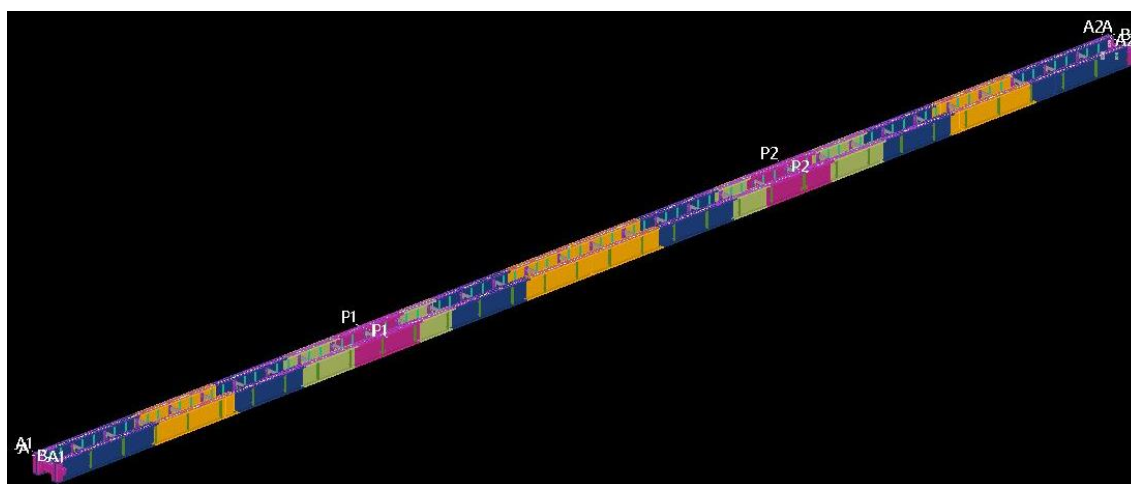


Figura 43 – Esquema 3D da estrutura da ponte

As vigas longitudinais são fabricadas em segmentos e soldadas no local da obra, com a qualidade adequada. Os banzos das vigas têm largura constante, 900 mm o superior e 1000 mm o inferior, sendo que a espessura destes elementos varia longitudinalmente de maneira a satisfazer as tensões internas instaladas. As almas têm diferentes alturas e espessuras dependendo das dimensões dos banzos.

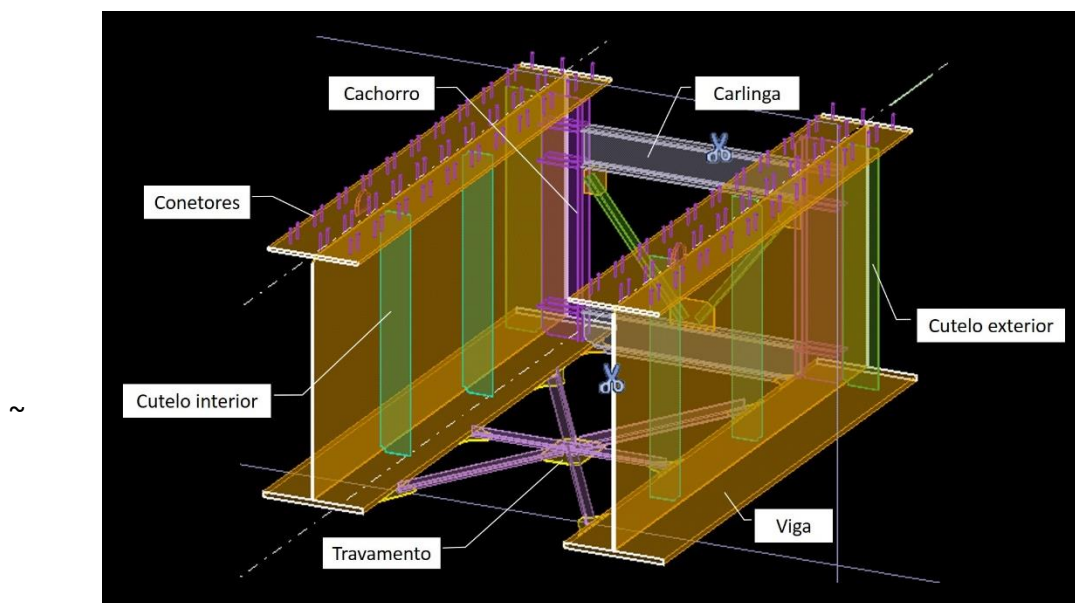


Figura 44 – Identificação dos elementos constituintes da estrutura

A estrutura metálica do *deck* é formada por carlingas espaçadas longitudinalmente de 5 m de distância, estando estas conectadas às vigas principais através de cachorros. No nível inferior da estrutura são utilizados travamentos de forma a conectar os banzos inferiores das vigas longitudinais. Ao longo de todo o comprimento da ponte existem cutelos que fazem a ligação dos banzos superior e inferior e oferecem robustez à estrutura. A conexão entre as vigas longitudinais e as lajes de betão é materializada através de conectores com diâmetro 19. Na Figura 44 estão identificados os elementos descritos anteriormente. Para compensar a deflexão vertical provocada pelas cargas permanentes, será aplicada às vigas uma contra-flecha para compensar este efeito. O acoplamento entre as vigas e os pilares é realizada através um rolamento específico para este tipo de ligações. Este elemento é responsável pela transferência de cargas verticais e horizontais entre a superestrutura e a subestrutura, permitindo um movimento de rotação limitado.

3.3 Requisitos do projeto

Analisado o caderno de encargos, existem requisitos a ser cumpridos de forma a proporcionar a qualidade pretendida pelo cliente. Todos os fabricantes e fornecedores de materiais e consumíveis, assim como os processos de fabrico e montagem, devem ser enviados para aprovação por parte do cliente. Só após esta aprovação é que se deve proceder à encomenda de material e preparação da fase de fabrico. Na Tabela 6 estão apresentadas as normas que devem ser aplicadas para o cumprimento dos requisitos de qualidade.

Tabela 6 – Normas a aplicar para o fabrico da estrutura

| | | | |
|----------|--------------------------|--|---|
| Material | Aço estrutural | Perfis e chapas até 25 mm – S355 JR | EN ISO 10025 EN ISO 10219-1 |
| | | Chapas com espessura entre 26 mm e 40 mm – S355 J0 | EN ISO 10029 (Classe B) EN ISO 10034 |
| | | | EN ISO 10136-2 (Classe A1) |
| | | Chapas com espessura superior a 41 mm – S355 J2 | EN ISO 10136-2 (Classe C1) EN ISO 10160 |
| | | | EN ISO 10204 |
| | Conectores | Tensão de cedência ≥ 350 N/mm ² | EN ISO 13918 |
| | | Tensão de rotura ≥ 450 N/mm ² | EN ISO 14555 |
| | | Alongamento $\geq 15\%$ | |
| | Consumíveis de soldadura | Eléctrodo | EN ISO 14171 EN ISO 14174 EN ISO 17632-A |
| | | Gás de protecção | EN ISO 14175 |
| Fabrico | Geral | Classe de execução 3 | EN ISO 1090-2 |
| | Soldadura | Procedimentos e especificações de soldadura (Geral) | EN ISO 3834-2 |
| | | Certificação de soldadores | EN ISO 9606-1 |
| | Soldadura | Verificação da qualificação dos soldadores e/ou procedimentos de soldadura | EN ISO 287-1 EN ISO 1418 EN ISO 14732 EN ISO 14555 |

| | | | |
|----------|---|---|---|
| Montagem | Especificações da execução da soldadura | | EN ISO 15614-1 EN ISO 15609-1 EN ISO 1011-1,2 |
| | Tratamentos anticorrosivos | Preparação das superfícies | EN ISO 8501-1 |
| | | Revestimento corrosivo de proteção – C3 | EN ISO 12944-5 |
| | Montagem | Montagem da estrutura | EN ISO 1090-2 |
| | | | |

3.4 Gestão do projeto

No decorrer deste capítulo, serão abordadas as etapas que foram percorridas para o correto fabrico da estrutura metálica, de maneira a garantir a melhor qualidade e eficiência dos trabalhos. Cada um dos próximos subcapítulos corresponde a uma etapa do processo de gestão do projeto.

3.4.1 Plano de trabalhos

O plano de trabalhos (ANEXO 1 – Plano de trabalhos) foi o primeiro documento a ser elaborado e indica de forma cronológica como devem ser executados todos os trabalhos necessários ao fabrico da estrutura. Além disso, também indica o tempo previsto para a execução de cada tarefa. Este tempo é estimado com base nos rácios de fabrico implementados na empresa.

O plano de trabalhos proposto divide o processo em três fases: 1ª fase diz respeito à estrutura entre os pilares A2 e P2, a 2ª fase entre P2 e P1 e a 3ª fase entre P1 e A1. A Figura 45 é um excerto do plano e apresenta a 1ª fase de trabalho, que se iniciou após a receção dos desenhos definitivos do cliente.

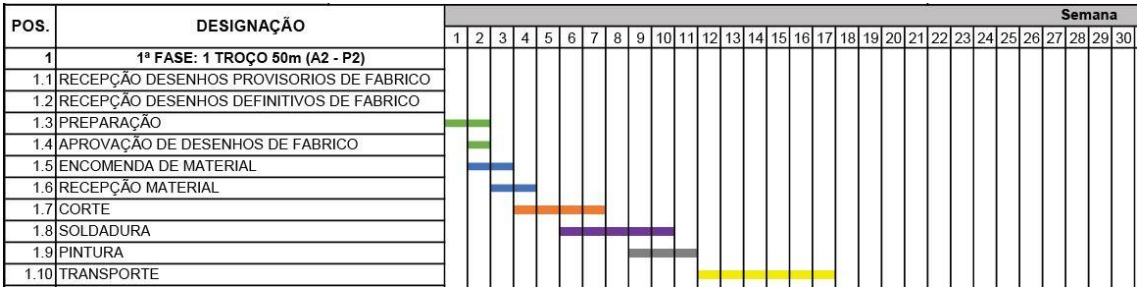


Figura 45 – Plano para a 1ª fase de trabalho (excerto do plano de trabalhos)

3.4.2 Análise e otimização do projeto

Como já referido, a análise do projeto pretende conseguir uma otimização na estrutura de maneira a reduzir o tempo e melhorar os processos de fabrico e montagem. Partindo da análise dos desenhos fornecidos pelo cliente, e com o decorrer da modelação 3D da estrutura, foram possíveis as alterações apresentadas na Tabela 7. É de salientar que todas as modificações efetuadas foram submetidas e aprovadas pelo cliente.

Tabela 7 – Alterações realizadas no projeto

| Descrição da alteração | Explicação da alteração |
|----------------------------------|---|
| Modificação do material da chapa | Modificou-se a qualidade de todas as chapas para S355 J2. A realização desta alteração deve-se principalmente para facilitar a procura de matéria-prima no mercado, uma vez que muitos fabricantes concebem a maioria dos seus produtos com a qualidade J2, por a procura ser baixa quando se trata de outras qualidades de materiais. Além disso, os custos associados não são significativos e o cliente não sai prejudicado com a alteração. |

Modificação da geometria das emendas entre vigas

Modificou-se a geometria inicial em “U” das emendas para uma geometria em “Z”. Esta alteração tem como objetivo facilitar e reduzir o tempo de montagem das vigas em obra, uma vez que só é necessário pousar uma em cima da outra e não fazê-las encaixar. Nesta alteração, é importante construir as emendas de acordo com o sentido de montagem (Figura 46).

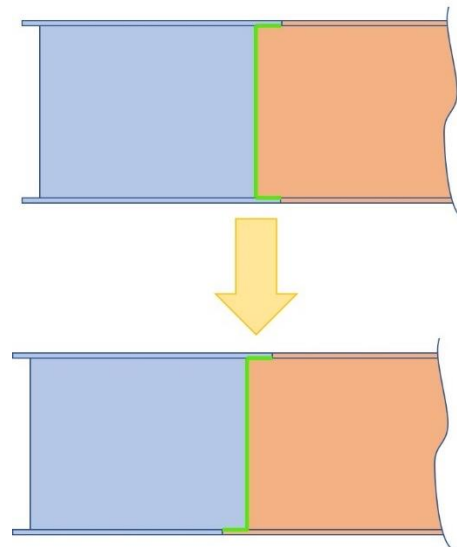


Figura 46 – Alteração da geometria das emendas entre vigas

Alteração da localização e aumento do número de emendas

A modificação da geometria das emendas das vigas obriga à alteração da localização das próprias emendas, devido à posição dos cutelos e cachorros. Na fase de encomenda de material pretende-se encomendar chapas com um comprimento máximo de 12 m. Este valor limitou o comprimento dos banzos e almas, que por sua vez limitaram o comprimento das vigas. Em termos de transporte, o objetivo é que a maioria das vigas sejam transportadas em contentores *open top*, por isso, o seu comprimento deve ser inferior a 12 m. Pelos motivos anteriormente apresentados, foi necessária a realização de emendas que não estavam previstas inicialmente nas vigas com um comprimento superior a 12 m. A alteração da localização das emendas realizou-se sempre no sentido da menor espessura dos elementos, isto é, fazendo crescer o elemento de maior espessura.

Alteração geométrica da junta de soldadura

Procedeu-se à alteração da altura do “nariz” do chanfro de $1/2$ da menor espessura para $1/3$. Com esta mudança pretende-se, no momento da montagem das vigas em obra, diminuir a quantidade de soldadura ao teto necessária (Figura 47).

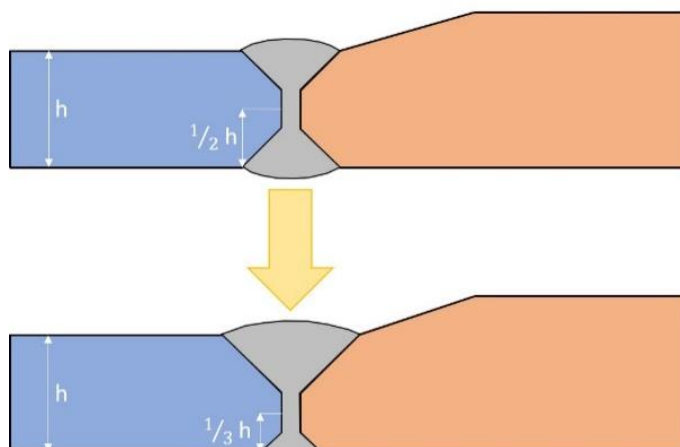


Figura 47 – Alteração geométrica da junta de soldadura nos banzos

Para facilitar a passagem da tocha e permitir a viragem ou continuação do cordão de soldadura, aumentou-se o raio dos chanfros de 30 mm para 50 mm (Figura 48).

Modificação
do raio dos
chanfros

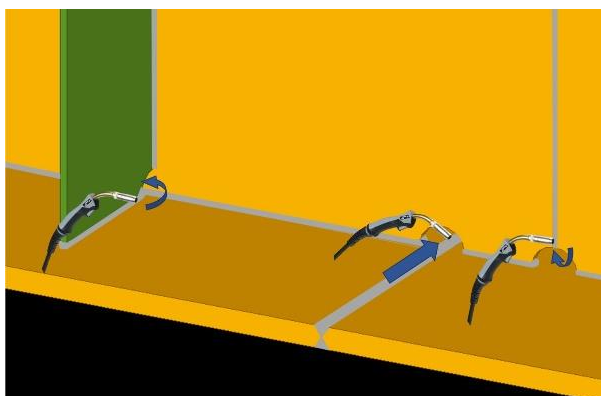


Figura 48 – Modificação do raio dos chanfros

Aumento do
comprimento
das almas e
banzos

Pela experiência demonstrada dos colaboradores em obras semelhantes à estudada, sabe-se que a soldadura entre os banzos e a alma vai provocar uma contração longitudinal da estrutura. Pela consulta do *Handbook* da American Welding Society (AWS) [79], não existe um valor ou equação para estimar a contração longitudinal de um cordão de canto. Desta forma, através da experiência dos colaboradores e do valor considerado, pela AWS, para a contração longitudinal de uma junta topo-a-topo, aumentou-se o comprimento dos banzos e das almas em 1 mm/m.

O projeto da estrutura inclui a consideração de uma contra-flecha nas vigas metálicas para suportar as cargas permanentes aplicadas na estrutura. A olho nu a curvatura dada nas almas é impercetível. Por isso, recorreu-se à marcação destes elementos através de chanfros com 5 mm de raio para indicar o lado inferior da alma (Figura 49).

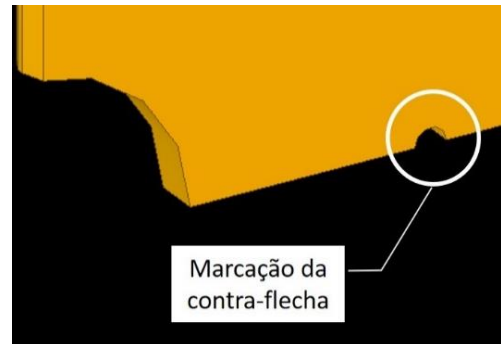


Figura 49 – Marcação da contra-flecha na alma

Realização de marcações nas almas

Para facilitar o posicionamento dos cutelos e cachorros na fase de montagem das vigas, realizaram-se furos com diâmetro de 6 mm nas almas (Figura 50).

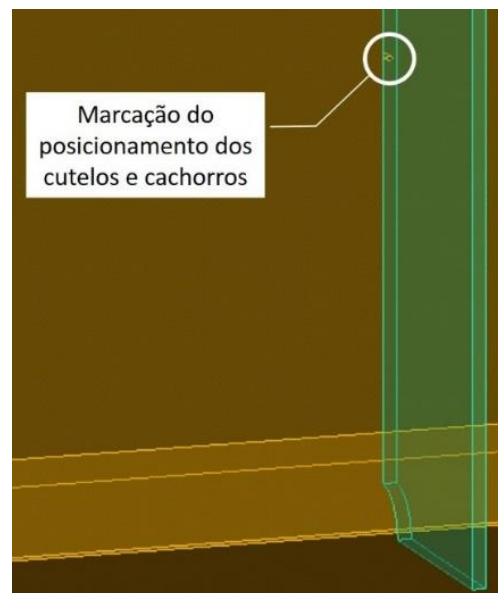


Figura 50 – Marcação do posicionamento dos cutelos e cachorros

Considerar uma folga entre banzo-cutelo e banzo-cachorro

Durante a soldadura do banzo à alma, outro defeito que pode ocorrer é a distorção angular dos banzos, que pode dificultar a montagem dos cutelos e dos cachorros. Segundo Kozak e Kowalski [107], o cálculo da distorção angular para juntas de canto depende de muitos parâmetros. Em alguns casos, o cálculo deste valor é significativamente diferente do obtido experimentalmente. Com recurso à experiência dos colaboradores em obras idênticas, diminuiu-se em 8 mm (4 mm de cada lado da peça) o comprimento dos cutelos e dos cachorros. A criação desta folga vai facilitar a montagem destes elementos nas vigas.

A geometria das chapas de ligação dos travamentos com os banzos inferiores não permite a correta aplicação do cordão de soldadura imposto no projeto (cordão de canto). Por isso, procedeu-se à alteração da geometria da chapa como indicado na Figura 51, que ajuda na execução do cordão de soldadura sobre a linha verde, evitando um cordão de má qualidade nos extremos da peça.

Modificação geométrica de peças

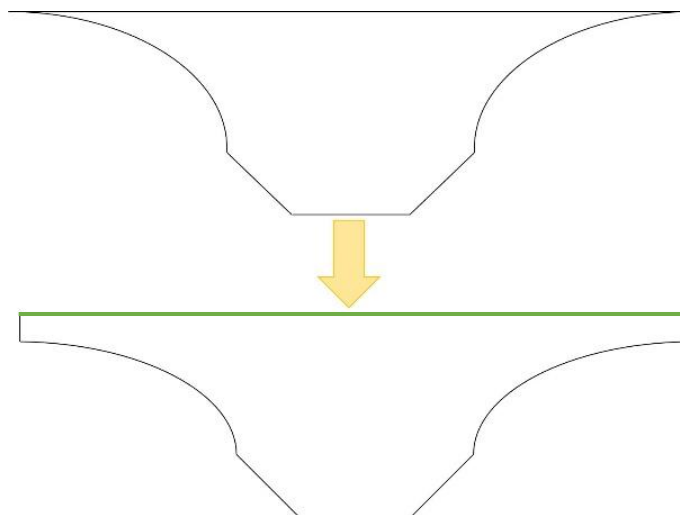


Figura 51 – Alteração geométrica de uma das chapas de ligação entre travamento e banzo inferior

Alteração do tipo de junta de soldadura

Esta alteração deveu-se sobretudo para proporcionar uma maior capacidade de carga à junta, fazendo aumentar o fator de segurança nas respetivas ligações soldadas. Esta modificação levou à alteração de cordões de canto para cordões com penetração total com chanfro em meio “V”. Com recurso à experiência dos colaboradores foram identificadas as zonas onde se deveria de proceder a esta alteração. Na Figura 52 estão assinalados com um círculo os cordões que foram alterados, sendo eles:

- Cordão de ligação das vigas nos topos da estrutura com os cachorros (Figura 52 - A);
- Cordão de ligação das vigas das carlingas com os cachorros (Figura 52 - B);
- Cordão de ligação entre as chapas que suportam os travamentos e o banzo inferior (Figura 52 - C);
- Cordão vertical de ligação das chapas de topo da estrutura com os cachorros (Figura 52 - D).

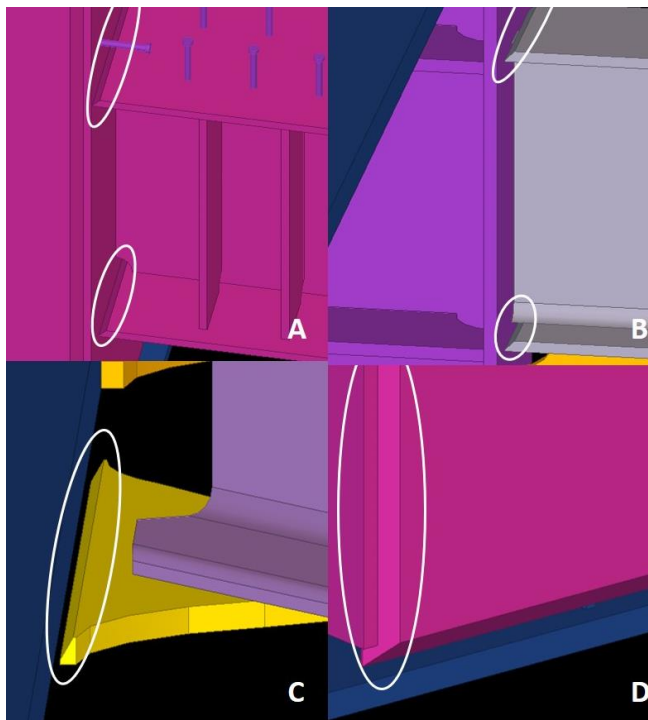


Figura 52 – Alterações efetuadas ao tipo de junta de soldadura: A - Cordão de ligação das vigas nos topos da estrutura com os cachorros; B - Cordão de ligação das vigas das carlingas com os cachorros; C - Cordão de ligação entre as chapas que suportam os travamentos e o banzo inferior; D - Cordão vertical de ligação das chapas de topo da estrutura com os cachorros

Além das alterações descritas na Tabela 7, outros aspetos foram tidos em consideração para facilitar o processo de fabrico e montagem da estrutura. Esses aspetos consistem em peças e estruturas auxiliares que permitam diminuir os tempos de fabrico e montagem. Para o fabrico da estrutura da ponte foram necessários:

- **Olhais de elevação** (Figura 53): estas peças facilitaram a movimentação das vigas dentro da oficina e simplificaram o processo de carga das vigas para os meios de transporte utilizados. No local da obra, estes componentes vão ser essenciais no posicionamento das vigas para a soldadura. Por cada viga foram utilizados dois olhais desfasados do eixo, de forma a manter o equilíbrio da viga, e a sua localização depende do centro de gravidade e do comprimento total da viga.



Figura 53 – Olhal de elevação

- **Gabari para soldadura:** estas estruturas foram essenciais para o correto posicionamento das peças antes de se efetuar a soldadura. Durante a fase de fabrico foram utilizados dois *gabarís* necessários para a soldadura dos banzos à alma e facilitar a soldadura dos outros subconjuntos à viga. Um dos *gabarís* é responsável por posicionar a viga a 45° durante a soldadura por arco submerso (Figura 54), conseguindo-se uma maior penetração do cordão, enquanto o outro permite efetuar a soldadura interrompida de forma a preparar a viga para a soldadura por arco submerso;



Figura 54 – Gabari para posicionar a viga a 45° durante a soldadura por arco submerso

- **Moldes de posicionamento e corte:** devido à quantidade de conetores que a estrutura precisa, sentiu-se a necessidade de fabricar um molde para fazer a marcação das posições dos conetores (Figura 55) de forma a executar a soldadura mais rapidamente. Para facilitar a montagem dos cachorros, cortou-se uma chapa com o posicionamento das peças necessárias à formação do conjunto, como se pode ver na Figura 56. Relativamente a moldes de corte, foram utilizadas chapas para marcar nas vigas das carlingas a geometria pretendida (Figura 57).

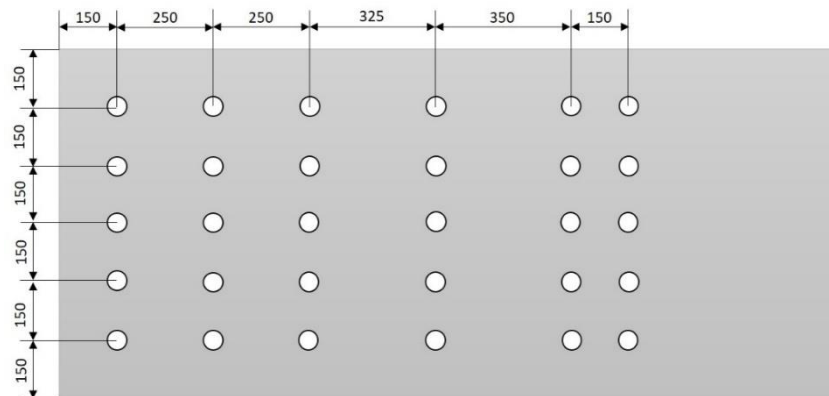


Figura 55 – Molde para marcação da posição dos conectores nas extremidades da viga

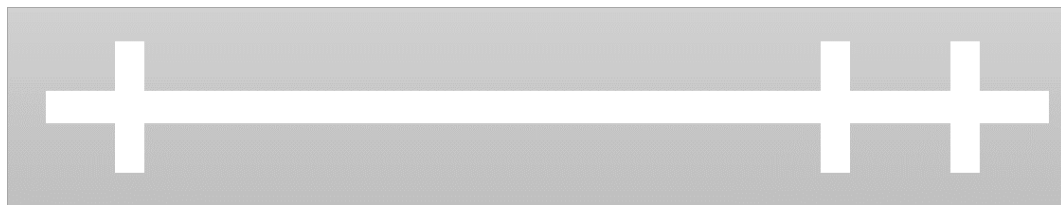


Figura 56 – Molde para posicionar chapas dos cachorros

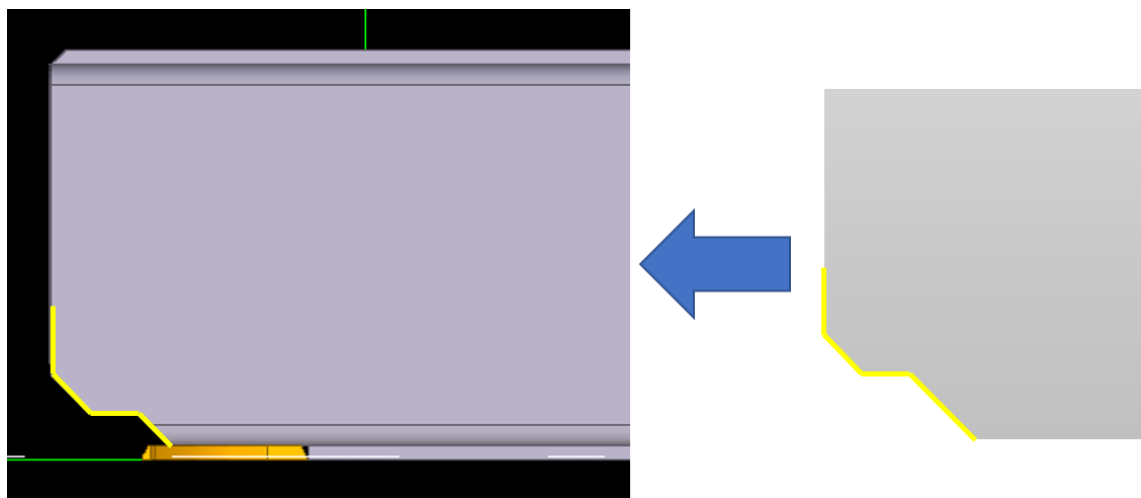


Figura 57 – Molde para cortar a geometria da viga das carlingas

3.4.3 Modelação 3D e desenhos técnicos

A criação do modelo 3D da estrutura iniciou-se após a receção dos desenhos do cliente (ANEXO 2 – Desenhos do cliente), com o auxílio do *software* Tekla Structures. A partir deste modelo foi possível realizar os desenhos detalhados para o fabrico, assim como um conjunto de listas úteis para a organização dos trabalhos, como vai ser explicado no subcapítulo 3.4.4.

O modelo 3D foi desenhado pelas fases descritas na Tabela 11. A criação destas fases permitiu uma melhor organização na conceção e no manuseamento do modelo. Foi durante a criação do 3D da estrutura que foram analisados vários problemas que, posteriormente, deram origem às alterações enunciadas no subcapítulo 3.4.2.

Tabela 8 – Fases de criação do modelo 3D

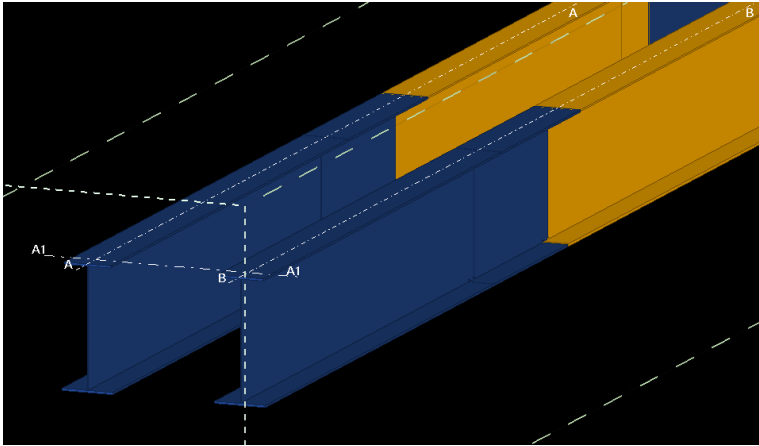
| Fase | Descrição |
|---------------------------------|--|
| 1ª fase – Vigas (alma + banzos) | <p>Na primeira fase desenharam-se todas as vigas com os respetivos chanfros, onde foi realizada a soldadura de união dos diferentes tipos de vigas. Na Figura 58 pode observar-se uma parte da 1ª fase de modelação e, como exemplo, é possível ver as cores utilizadas para identificar as vigas do tipo 1 (azul) e as vigas do tipo 2 (amarelo).</p>  <p>The image shows a 3D perspective view of a steel structure. It features several blue I-beams (Type 1) and yellow I-beams (Type 2) arranged in a parallel fashion. Dashed white lines indicate the alignment and connections between the beams. Labels 'A1', 'A', 'B', and 'B1' are visible, marking specific points or sections of the structure.</p> |

Figura 58 – 1ª fase da construção 3D da estrutura

Na fase 2 foram acrescentadas às vigas os cutelos e os cachorros (Figura 59).

2ª fase – Cutelos e cachorros

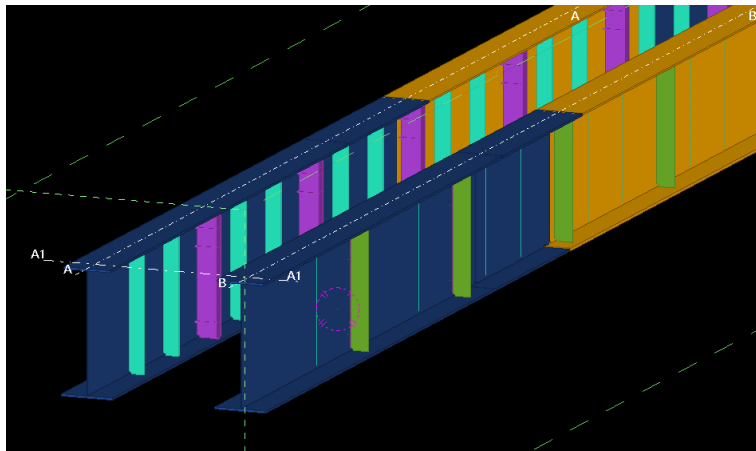


Figura 59 – 2ª fase da construção 3D da estrutura

A 3ª fase (Figura 60) consistiu em adicionar os conectores que fazem a ligação da estrutura metálica com os elementos de betão. Os conectores assinalados na figura pertencem aos conjuntos denominados de encontros, por isso foram desenhados na fase 6 e posteriormente movidos para esta fase para manter a organização do modelo 3D.

3ª fase –
Conectores

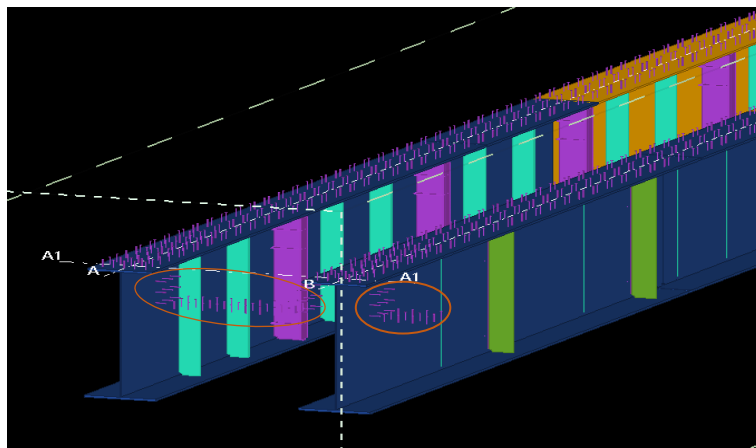


Figura 60 – 3ª fase da construção 3D da estrutura

Na 4ª fase adicionaram-se as carlingas (Figura 61).

4ª fase – Carlingas

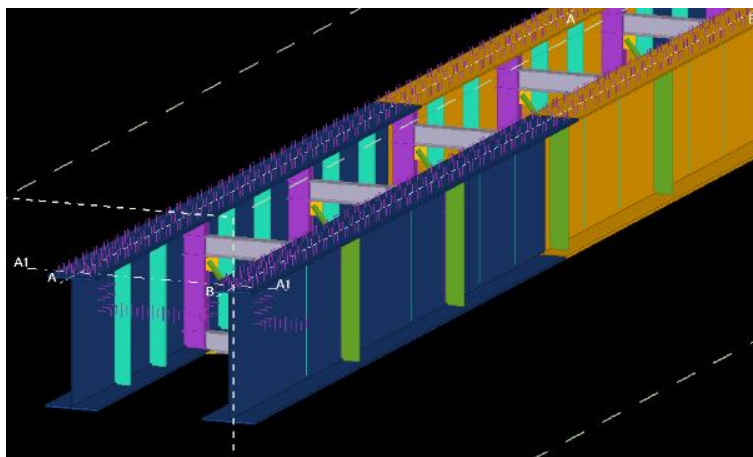


Figura 61 – 4ª fase da construção 3D da estrutura

Na 5ª fase desenharam-se os travamentos (Figura 62).

5ª fase –
Travamentos

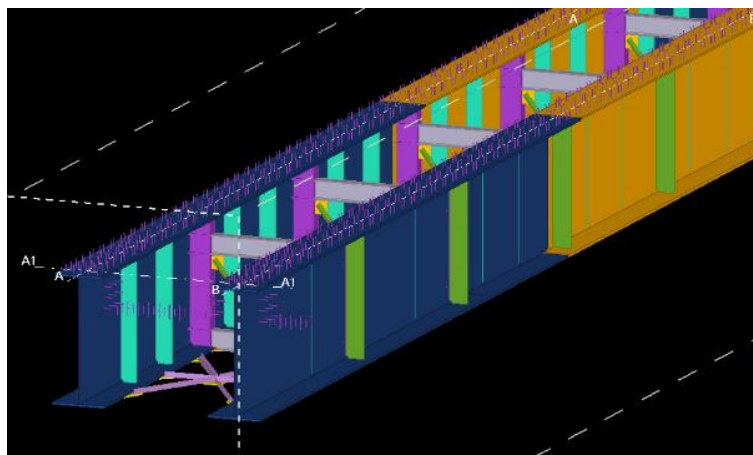


Figura 62 – 5ª fase da construção 3D da estrutura

Na 6ª fase foram desenhados os encontros (Figura 63). Estes conjuntos são responsáveis por concretizar a ligação da estrutura metálica aos pilares que se encontram nas margens.

6ª fase –
Encontros

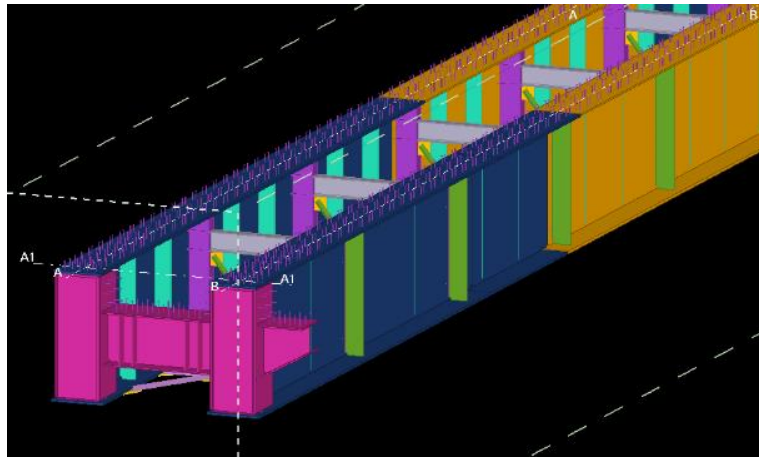


Figura 63 – 6ª fase da construção 3D da estrutura

As almas inicialmente desenhadas não têm a contra-flecha requerida no projeto (Figura 64 e Figura 65), e por isso, foi criada ao lado do modelo principal uma cópia de todos estes elementos de forma a corrigir a sua geometria. Além disto, é nesta fase que é aplicada a otimização que diz respeito ao aumento das almas para compensar a contração provocada no processo de soldadura. É desta fase que são retirados os desenhos de corte das almas.

7ª fase – Almas
para corte



Figura 64 – Contra-flecha requerida entre os pilares A1-P1 e P2-A2

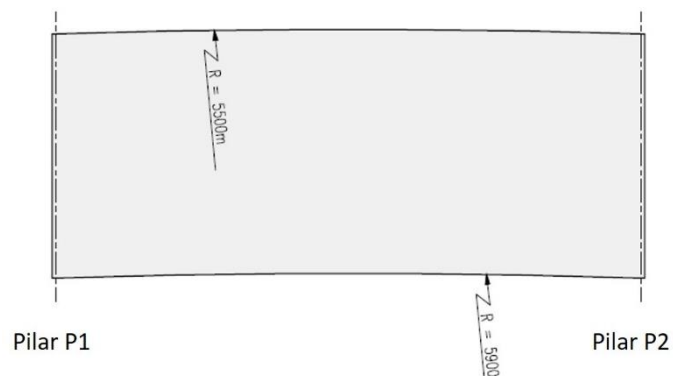


Figura 65 – Contra-flecha requerida entre os pilares P1-P2

8ª fase – Banzos para corte

Da mesma forma que acontece nas almas, os banzos necessitaram de um comprimento extra para compensar as contrações provocadas pela soldadura. Na fase 8 foi realizada uma cópia de todos os banzos e aplicado o princípio descrito no subcapítulo anterior referente a esta matéria.

9ª fase – Olhais

Na 9ª fase desenharam-se os olhais de elevação no modelo (Figura 66).

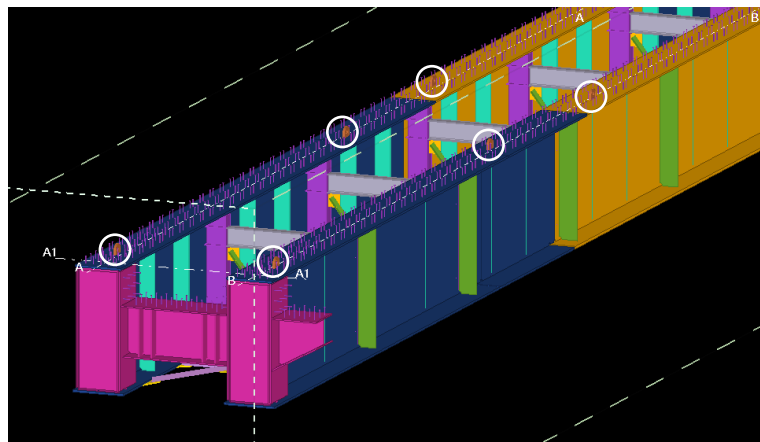


Figura 66 – 9ª fase da construção 3D da estrutura

Nesta fase adicionaram-se as marcas assinaladas na Figura 67 em todas as vigas. Como já foi referido anteriormente, esta marcação permite distinguir o sentido da contra-flecha nas almas.

10ª fase –
Marcação da
contra-flecha

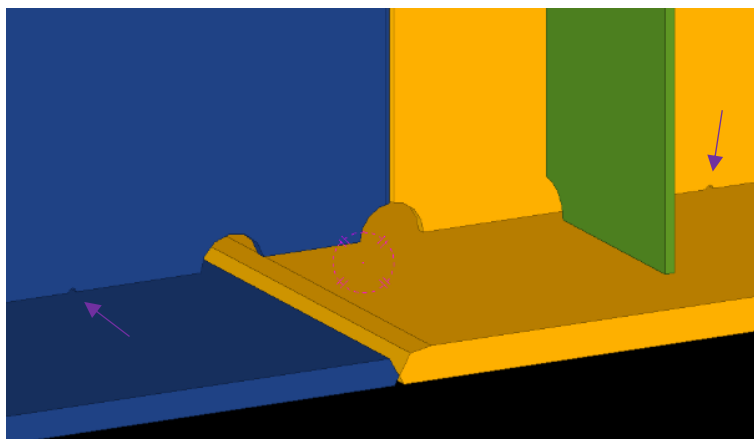


Figura 67 – 10ª fase da construção 3D da estrutura

Para a concretização das fases 7 e 8 foi realizado um pequeno estudo da contração do material após a soldadura. Como já foi referido, foi assumido o valor aproximado de 1 mm/m para corrigir o comprimento das almas e dos banzos. De forma a respeitar as dimensões do projeto, os elementos de uma mesma viga devem aumentar o seu comprimento de igual forma e o somatório dos aumentos considerados para cada viga deve ser de 165 mm, uma vez que o comprimento total da ponte é de 165 m. Na Tabela 9 é demonstrado o processo descrito anteriormente.

Tabela 9 – Estudo da contração das vigas

| Comprimento das almas [mm] | Comprimento dos banzos inferiores [mm] | Comprimento dos banzos superiores [mm] | Aumento considerado [mm] |
|----------------------------|--|--|--------------------------|
| 11459 | 11249 | 11749 | +11 |
| 3648 | 3648 | 3898 | +4 |
| 11148 | 11148 | 10898 | +11 |
| 1348 | 1848 | 849 | +1 |
| 10498 | 9998 | 10998 | +11 |
| 7998 | 7998 | 7998 | +8 |

| | | | |
|-------|-------|-------|-----|
| 9998 | 9998 | 9998 | +10 |
| 4998 | 4998 | 4998 | +5 |
| 11498 | 11498 | 11498 | +11 |
| 10248 | 10248 | 10248 | +10 |
| 10248 | 10748 | 9748 | +11 |
| 11498 | 10998 | 11998 | +12 |
| 4998 | 4998 | 4998 | +5 |
| 9998 | 9998 | 9998 | +10 |
| 7998 | 7998 | 7998 | +8 |
| 10498 | 10498 | 10498 | +10 |
| 1348 | 1848 | 848 | +1 |
| 11148 | 11148 | 10898 | +11 |
| 3648 | 3148 | 4398 | +4 |
| 11459 | 11749 | 11249 | +11 |

Durante este processo foram atribuídas cores a cada peça, que permitiram uma maior percepção e controlo do trabalho que estava a ser desenvolvido, como já exemplificado na Figura 58. Além disto, foi atribuída a cada peça e conjunto uma referência alfanumérica que permitiu a sua identificação durante o processo de fabrico e montagem. Na Tabela 10 estão identificadas as referências atribuídas a cada peça e conjunto. O “x” presente na referência representa a sua parte numérica que é atribuída automaticamente pelo *software*.

Tabela 10 – Referências atribuídas a cada peça e conjunto

| Designação da peça / conjunto | Referência |
|-------------------------------|------------|
| Banzos, almas e cutelos | C x |
| Conectores | CON x |

| | |
|-------------|-------|
| Cantoneiras | L x |
| Olhais | O x |
| IPE 360 | VC x |
| Vigas | V x |
| Cachorros | CC x |
| Carlingas | CAR x |
| Travamentos | TR x |
| Encontros | E x |

Com a finalização do modelo 3D obteve-se a estrutura já apresentada na Figura 43, seguindo-se a criação dos desenhos de fabrico (ANEXO 3 – Desenhos de fabrico). O conjunto de desenhos apresentados engloba três tipos de desenhos: gerais, conjunto e de peça. Os desenhos gerais servirão como referência na fase de montagem da estrutura em obra. Os desenhos de conjunto e de peça foram importantes na montagem dos próprios conjuntos em oficina. Para as fases de construção da estrutura (oficina e obra) realizou-se um desenho geral de soldadura, onde foram indicados os pormenores necessários à execução do processo. A Figura 68 ilustra, como exemplo, dois pormenores de soldadura.

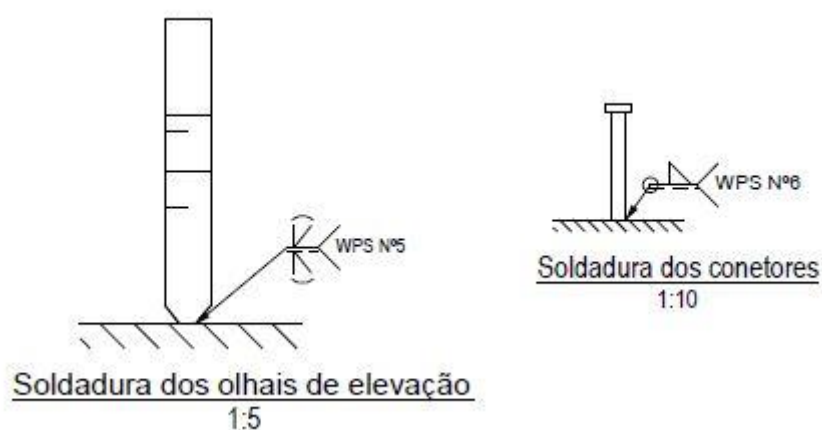


Figura 68 – Exemplos de pormenores de soldadura

3.4.4 Planeamento de fabrico

Através da informação disponibilizada pelo cliente e da obtida através do modelo 3D, realizado no subcapítulo anterior, elaborou-se um conjunto de documentos necessários à execução das tarefas descritas no plano de trabalhos, sendo eles:

- Lista para encomenda de material;
- Sequência de fabrico;
- Folha de gama operatória;
- Folhas de operação;
- Análise FMEA aos processos de fabrico.

3.4.4.1 Encomenda de material

Com o modelo 3D terminado, o *software* Tekla Structures permitiu a emissão de uma variedade de listas, uma das quais a lista de material. Esta lista possibilitou a seleção dos materiais (chapas e perfis) necessários ao fabrico da estrutura. Antes da concretização da encomenda, selecionaram-se as dimensões mais comuns dos produtos disponíveis no mercado e realizou-se um estudo de forma a conseguir o menor desperdício de material possível. O estudo foi realizado manualmente estimando-se a quantidade de peças que seriam possíveis de cortar numa determinada chapa ou perfil. A Tabela 11 indica o material a encomendar de acordo com a fase de fabrico em que é necessário. O plano de trabalhos indica em que momento foi realizada a encomenda

Tabela 11 – Lista de material a encomendar por fase

| Fase | Quantidade | Material | Espessura chapa / Tipo de perfil | Dimensões |
|---------------------|------------|----------|-------------------------------------|----------------|
| 1 ^a Fase | 13 | S355 JR | IPE 360 | 12 [m] |
| | 10 | S355 JR | L80*8 | 12 [m] |
| | 55 | S355 JR | L100*12 | 6 [m] |
| | 5350 | S355 J2 | Conectores | D19 x 150 [mm] |
| | 3 | S355 J2 | PL 12 | 6x2,5 [m] |
| | 4 | S355 J2 | PL 14 | 12x2,5 [m] |
| | 9 | S355 J2 | PL 15 | 12x2,5 [m] |

| | | | | |
|---------|---|---------|--------|------------|
| | 4 | S355 J2 | PL 16 | 12x2,5 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 16 | 8x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 18 | 12x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 20 | 12x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 25 | 12x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 30 | 12x2 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 30 | 8x2,5 [m] |
| | 4 | S355 J2 | PL 40 | 12x2 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 40 | 8x2 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 40 | 6x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 70 | 8,1x2 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 100 | 12x2 [m] |
| 2ª Fase | 2 | S355 J2 | PL 14 | 12x2,5 [m] |
| | 4 | S355 J2 | PL 16 | 12x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 18 | 12x2,5 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 30 | 12x2 [m] |
| | 4 | S355 J2 | PL 40 | 12x2 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 70 | 12x2 [m] |
| 3ª Fase | 2 | S355 J2 | PL 14 | 12x2,5 [m] |
| | 4 | S355 J2 | PL 16 | 12x2,5 [m] |
| | 1 | S355 J2 | PL 16 | 8x2,5 [m] |
| | 2 | S355 J2 | PL 18 | 12x2,5 [m] |

| | | | |
|---|---------|--------|------------|
| 2 | S355 J2 | PL 20 | 12x2,5 [m] |
| 1 | S355 J2 | PL 30 | 12x2 [m] |
| 4 | S355 J2 | PL 40 | 12x2 [m] |
| 1 | S355 J2 | PL 40 | 8x2 [m] |
| 2 | S355 J2 | PL 70 | 8,1x2 [m] |
| 2 | S355 J2 | PL 100 | 12x2 [m] |

3.4.4.2 Sequência de fabrico

A sequência de fabrico permitiu organizar os processos desenvolvidos em oficina e as movimentações de material entre postos. A definição das operações de fabrico possibilitou a organização de equipamentos e colaboradores para desencadear um processo eficaz e eficiente, com o objetivo de obter um produto final de qualidade.

Como matéria-prima teve-se o material presente na Tabela 11 que, após a execução de todo o procedimento de fabrico, foi transformado nos conjuntos ou peças presentes na lista de expedição apresentada no subcapítulo 3.4.6. Relativamente aos processos de fabrico utilizados, estes podem ser divididos em 3 grupos: corte, soldadura e pintura. Cada grupo é constituído por diferentes postos, cada um com o seu objetivo, como é demonstrado pela sequência de fabrico apresentada na Figura 69. A Tabela 12 apresenta a legenda referente à sequência de fabrico. As operações de corte foram responsáveis por obter todas as peças necessárias ao fabrico da estrutura, tendo-se recorrido aos processos de corte por plasma e oxicorte. Contudo, em algumas peças foi necessária uma segunda intervenção para a realização de alterações geométricas, onde se recorreu a equipamentos como rebarbadoras e maçaricos. Após a realização destas operações, o colaborador responsável por cada posto foi sensibilizado para proceder a uma verificação dimensional das peças através dos respetivos desenhos de fabrico. Esta ação foi vantajosa na medida em que diminuiu a probabilidade de produzir um conjunto defeituoso. Terminadas todas as operações relativas ao corte, as peças seguem para os postos de soldadura. A concretização dos conjuntos necessários realizou-se através de três procedimentos de soldadura: MIG-MAG (138), arco-submerso (121) e *stud welding* (783). De forma a garantir a qualidade exigida, os conjuntos são submetidos a dois controlos finais, o dimensional e o de soldadura. Com a aprovação dos conjuntos através dos controlos aplicados, estes seguem para a empresa subcontratada para a realização do processo de pintura. Esta empresa foi responsável por executar os procedimentos de forma a garantir a qualidade exigida pelo cliente.

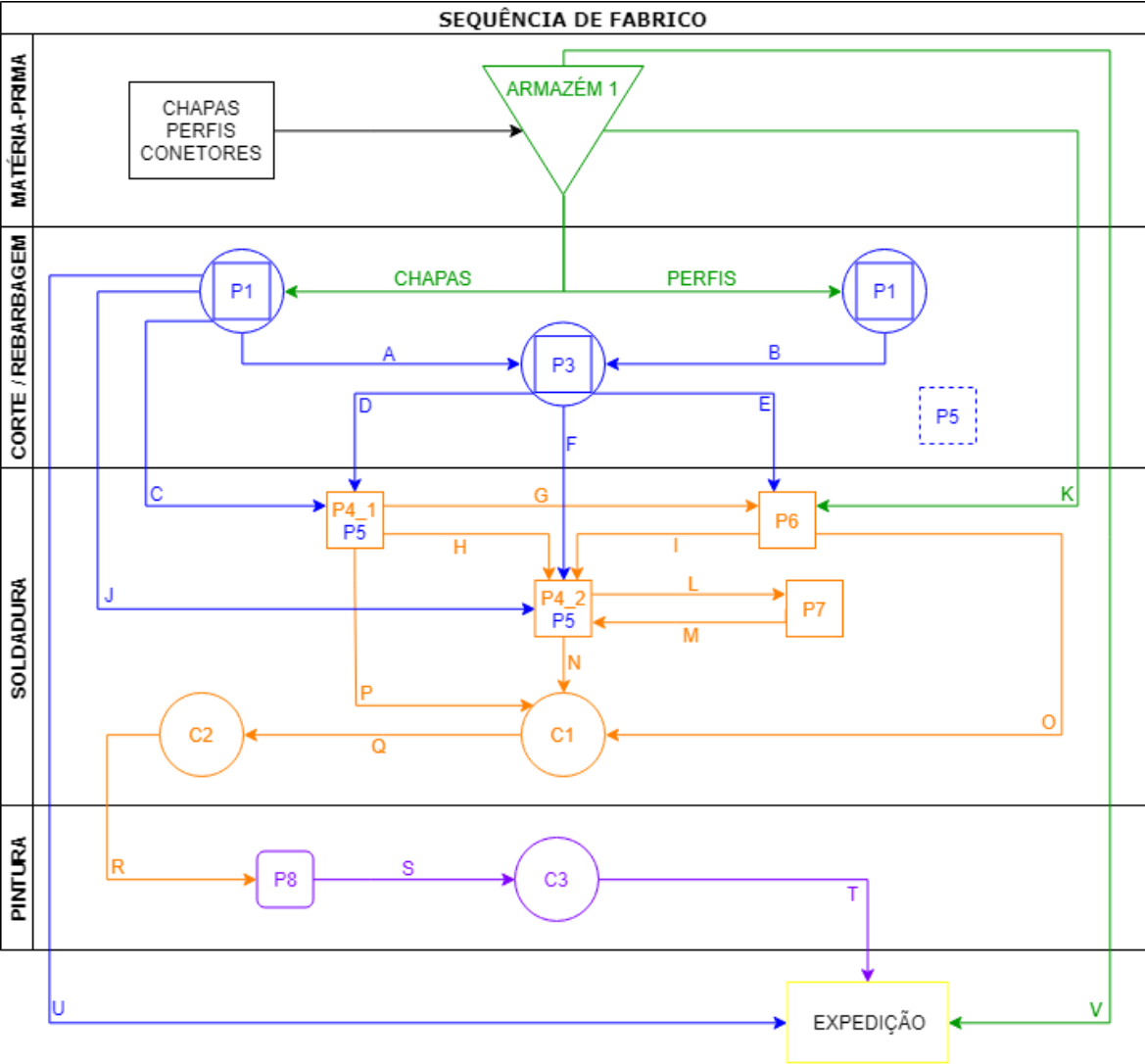


Figura 69 – Sequência de fabrico da estrutura metálica da ponte

Tabela 12 – Legenda referente à sequência de fabrico da Figura 69

| Processos / controlos / armazéns | |
|----------------------------------|---|
| Armazém 1 | Armazém de matéria-prima |
| P1 | Operação de corte por comando numérico computadorizado (CNC) de chapa com controlo dimensional no posto |
| P2 | Operação de corte com serrote de perfis com controlo dimensional no posto |
| P3 | Operação de execução de chanfros com controlo dimensional no posto |

| | |
|-------------------|---|
| P4_1 | Operação de soldadura pelo processo 138 (Fase 1) |
| P4_2 | Operação de soldadura pelo processo 138 (Fase 2) |
| P5 | Operação de afagar cordão de soldadura |
| P6 | Operação de soldadura pelo processo 783 |
| P7 | Operação de soldadura pelo processo 121 |
| P8 | Operação de pintura |
| C1 | Controlo dimensional |
| C2 | Controlo de soldadura |
| C3 | Controlo de pintura |
| Peças / conjuntos | |
| A | Chapas para realizar chanfros |
| B | Perfis para realizar chanfros |
| C | Chapas provenientes diretamente da operação de corte |
| D | Todos os banzos com emendas + chapas e perfis para fabricar subconjuntos |
| E | Banzos superiores (largura de 900 mm) sem necessidade de emenda |
| F | Banzos inferiores (largura de 1000 mm) sem necessidade de emenda + almas + suportes dos travamentos |
| G | Banzos superiores (largura de 900 mm) com emenda + encontros com necessidade de conetores |
| H | Banzos inferiores (largura de 1000 mm) com emenda + cachorros + encontros que não necessitam de conetores |
| I | Banzos superiores e os encontros com conetores soldados |
| J | Cutelos necessários à montagem das vigas |

| | |
|---|--|
| K | Conectores necessários ao fabrico em oficina |
| L | Estrutura das vigas pré-montada (alma + banzos) |
| M | Estrutura das vigas soldada |
| N | Vigas completas |
| O | Encontros com conectores soldados para expedição |
| P | Carlingas e travamentos |
| Q | Vigas e subconjuntos para expedição após controlo dimensional |
| R | Vigas e subconjuntos para expedição após controlo de soldadura |
| S | Vigas e subconjuntos pintados |
| T | Vigas e subconjuntos prontos para expedição |
| U | Chapas para expedição |
| V | Conectores para expedição |

3.4.4.3 Folha de gama operatória

A folha de gama operatória é um documento complementar à sequência de fabrico e resume de forma genérica as operações de fabrico. Nesta folha identificaram-se os conjuntos e peças que foram obtidos após a conclusão de todas as operações de fabrico. Relativamente às operações, identificaram-se os equipamentos, ferramentas e/ou consumíveis necessários à sua execução. Com base na contabilização de tempo realizada, foram identificadas para cada operação as horas despendidas na sua execução, perfazendo um total de 4084 horas de trabalhos em oficina. No ANEXO 4 – Folha de gama operatória é apresentada a folha de gama operatória realizada para a obra em estudo.

Na Figura 70 é apresentada a tabela resumo das operações de fabrico. É importante referir que os tempos contabilizados incluem o período gasto com movimentações de peças e conjuntos. O tempo despendido nas operações P3 e P5 foi contabilizado, respetivamente, nas operações P1 ou P2 e P4, por serem consideradas operações secundárias e servirem de complemento às principais. A existência de operações sem qualquer tempo associado deve-se ao facto de estas não interferirem nos trabalhos desenvolvidos em oficina ou por não serem realizadas nas instalações da empresa.

| OP. | DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO | EQUIPAMENTO | FERRAMENTAS / CONSUMÍVEIS | TEMPO [horas] |
|-------|-----------------------------------|---|---|---------------|
| P1 | Corte CNC de chapa | SOITAAB / ECS ESAB SUPRAREX SXE-P4500 KRONOS KR32SP | Eléttodos Líquido de refrigeração Gás de proteção Gás de combustão | ≈ 748 |
| P2 | Corte com serrote de perfis | KALTENBACH KBS750DG | Folhas / fitas de serra Óleo de corte | 17 |
| P3 | Execução de chanfros | Maçarico de corte Rebarbadora | Gás de combustão Disco de corte | --- |
| P4 | Soldadura pelo processo 138 | Máquina de soldar MIG (várias) | Gás de proteção Fio de eléttrodo | 2810 |
| P5 | Afagar cordão de soldadura | Rebarbadora | Rolo de lixa | --- |
| P6 | Soldadura pelo processo 783 | NEWWELD 6000 | Acessório para a cabeça da pistola | ≈ 102 |
| P7 | Soldadura pelo processo 121 | ESAB LAF 1000 DC | Fluxo Fio de eléttrodo | 407 |
| P8 | Pintura | --- | --- | --- |
| C1 | Controlo dimensional | Fita métrica (10 m) | --- | --- |
| C2 | Controlo de soldadura | --- | --- | --- |
| C3 | Controlo de pintura | --- | --- | --- |
| --- | Movimentação de peças e conjuntos | Ponte rolante (5 e 10 ton.) | Correntes / Gancho / Íman | --- |
| TOTAL | | | | 4084 |

Figura 70 – Tabela resumo das operações de fabrico (excerto da folha de gama operatória)

3.4.4.4 Folhas de operação

As folhas de operação são documentos que detalham as operações de fabrico, especificando como estas devem ser executadas. Tendo em conta os processos escolhidos para a concretização da obra, realizaram-se as seguintes folhas de operação:

- **Lista de corte**

A lista de corte permitiu identificar e garantir que todas as peças necessárias ao fabrico da estrutura, provenientes das operações de corte, eram obtidas. Esta lista apresenta três fases de corte que foram realizadas conforme o cronograma apresentado no plano de trabalhos. Além disto, são identificadas algumas especificações das peças, como a quantidade e as dimensões, que foram verificadas após a realização do processo de corte. A Figura 71 apresenta um excerto da lista de corte com algumas das peças a obter após a 1ª fase do processo. A lista de corte completa encontra-se disponível no ANEXO 5 – Folhas de operação.

| Peça | Perfil | Qtd. | Material | Comp. (mm) | Área (m ²) | Peso (kg) |
|---------|----------|------|----------|------------|------------------------|-----------|
| 1ª FASE | | | | | | |
| C1 | PL12*197 | 8 | S355J2 | 500 | 0,11 | 4,53 |
| C2 | PL12*172 | 3 | S355J2 | 622 | 0,12 | 4,88 |
| C41 | PL12*172 | 3 | S355J2 | 622 | 0,12 | 4,88 |
| C388 | PL12*220 | 64 | S355J2 | 270 | 0,12 | 5,23 |
| C389 | PL12*260 | 32 | S355J2 | 440 | 0,24 | 10,41 |
| C391 | PL12*430 | 33 | S355J2 | 610 | 0,52 | 23,57 |
| C392 | PL12*197 | 58 | S355J2 | 500 | 0,11 | 4,53 |

Figura 71 – Excerto da lista de corte com algumas peças a obter na 1ª fase do processo

• Procedimentos de corte

Como referido anteriormente, foram necessárias várias operações de corte que incluíram diferentes procedimentos com fim a obter as peças presentes na lista de corte. Os procedimentos foram selecionados tendo em consideração os meios disponíveis em oficina. Relativamente ao corte de chapa foram selecionados dois processos, plasma para chapas com espessura até 30 mm, e oxicorte para espessuras superiores a 30 mm. Estes procedimentos foram realizados por CNC e as folhas de operação obtidas encontram-se no ANEXO 5 – Folhas de operação. É muito importante o cumprimento das folhas de operação CNC para que não seja necessário mais material do que o apresentado na lista de encomenda. Para a realização destes procedimentos recorreu-se a subempreiteiros que foram responsáveis pelo corte de todos os banzos da estrutura. Esta opção ajudou a agilizar o processo de corte de forma a iniciar-se a soldadura das vigas o mais rápido possível. A Figura 72 apresenta o pormenor de uma alma realizado através do procedimento de corte por plasma.

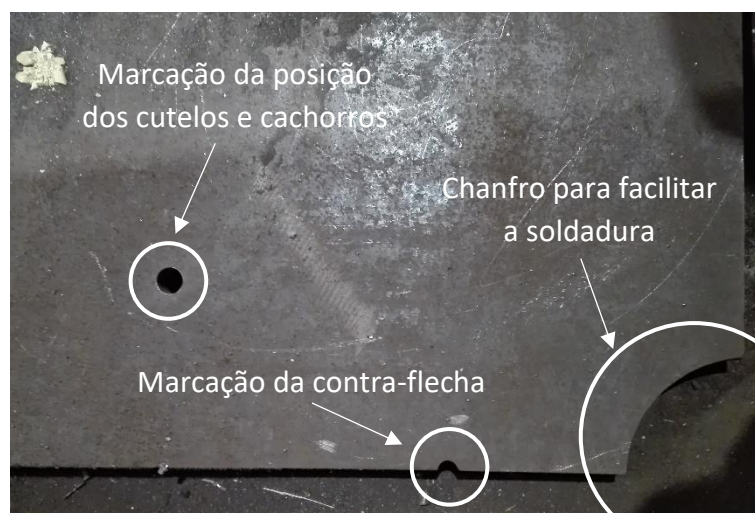


Figura 72 – Pormenor do corte de uma alma

O corte de perfis foi realizado de forma manual através de um serrote de fita e com o auxílio dos desenhos de fabrico. Para garantir que o material encomendado seja suficiente, o corte dos perfis realizou-se como indicado na Tabela 13.

Tabela 13 – Procedimento de corte de perfis

| Fase | Perfil (matéria-prima) | Procedimento |
|---------|------------------------|---|
| 1ª fase | IPE 360 | O corte das peças com as referências VC25, VC26, VC27, VC28, VC30, VC31, VC32 e VC33 distribuiu-se de forma indiferente sobre os perfis IPE 360, pois este não tem influência sobre o aproveitamento de material. |
| 1ª fase | L80*8 | O corte das peças com a referência L13 distribuiu-se de forma indiferente sobre os perfis em “L”, pois este não tem influência sobre o aproveitamento de material. |
| 1ª fase | L100*12 | O corte das peças com as referências L14, L15 e L16 distribuiu-se da seguinte forma: - Cortar 33 perfis: 2 x L15 ou L16 + L14; - Cortar 22 perfis: 3 x L15 ou L16. |

Se o procedimento descrito anteriormente não fosse respeitado, o material encomendado não seria suficiente e obrigaria a uma nova encomenda de material, com consequências nos custos finais da obra. Após o corte dos perfis, algumas destas peças seguiram para o procedimento de rebarbagem, que teve como objetivo realizar geometrias mais complexas (Figura 73) que não são possíveis obter a partir do corte com serrote.

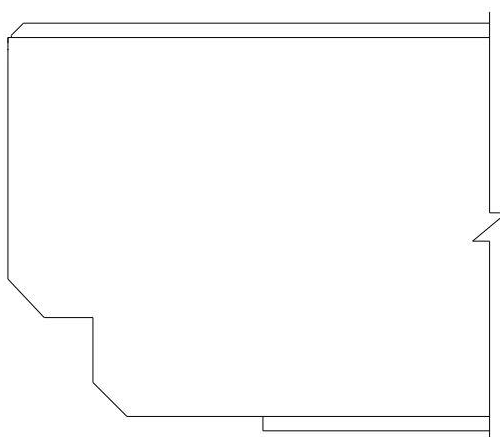


Figura 73 – Exemplo de geometria realizada através de rebarbagem

Além disto, o procedimento de rebarbagem também foi útil após a soldadura de certos elementos onde foi necessário afagar o cordão obtido nas zonas indicadas nos desenhos de fabrico. A Figura 74 ilustra um cordão de soldadura após o procedimento de rebarbagem.



Figura 74 – Cordão de soldadura após o procedimento de rebarbagem

Para a correta execução dos procedimentos de soldadura, algumas peças necessitaram da realização de chanfros. Para isso, foi utilizado um procedimento de corte através de maçarico e recorreu-se à rebarbagem como um procedimento auxiliar. Na Figura 75 é apresentado um chanfro realizado num dos banzos e onde se pode observar as zonas onde se utilizaram o corte por maçarico e a rebarbagem. Os desenhos de fabrico foram importantes nos procedimentos de rebarbagem e de corte por maçarico, pois assistiram os colaboradores durante a execução dos trabalhos.



Figura 75 – Chanfro num banzo

- **Lista de peças por conjunto**

A lista de peças por conjunto foi útil no decorrer das operações de soldadura. Esta lista tem como função identificar as peças necessárias para a formação de um determinado conjunto. Com isto, a organização dos trabalhos foi mantida e assegurou que todos os conjuntos finais se encontraram em conformidade com os desenhos de fabrico. A lista de peças por conjunto realizada para esta obra encontra-se no ANEXO 5 – Folhas de operação.

- **Procedimentos de soldadura**

Como já referido na sequência de fabrico e na folha de gama operatória, foram necessários para a realização desta obra três processos de soldadura: MIG-MAG (138), arco-submerso (121) e *stud welding* (783). A garantia da correta execução dos processos é garantida através das respetivas WPS, que devem ser qualificadas pelo procedimento descrito no subcapítulo 2.3.5.2. As WPS apresentadas no ANEXO 5 – Folhas de operação foram submetidas para aprovação por parte do cliente e, posteriormente, utilizadas para a execução dos processos de soldadura. No entanto, após a análise das mesmas, encontraram-se alguns pontos que poderiam ser corrigidos. Pela consulta da norma EN ISO 15614-1 [108], o seu capítulo 8 identifica os domínios de validade de qualificação que devem ser respeitados num procedimentos de soldadura, tendo-se verificado as melhorias presentes na Tabela 14 para cada WPS.

Tabela 14 – Melhorias a aplicar nas WPS

WPS 048-1

- Pela norma EN ISO 15614-1, não é permitido utilizar uma prova de procedimento multi-processo para qualificar qualquer processo isolado, exceto se os ensaios realizados em cada processo estiverem de acordo com esta norma. Apesar de a condição acima se verificar, uma vez que a maioria dos processos de soldadura são utilizados isoladamente uns dos outros, é preferível existir uma qualificação individual para cada um.

WPS 048-2

- Verifica-se a mesma condição do multi-processo da WPS 048-1;
 - A WPS sai da gama de qualificação das espessuras da welding procedure qualification record (WPQR) por 1 mm. É recomendável refazer a WPS através de uma WPQR diferente que compreenda as espessuras a soldar.
-

WPS 048-3

- Verifica-se a mesma condição do multi-processo das WPS 048-1 e WPS 048-2;
 - Verifica-se a mesma falha relativamente à gama de qualificação de espessuras da WPS 048-2;
 - Pela norma EN ISO 15614-1, qualquer soldadura de topo-a-topo qualifica soldaduras de topo-a-topo de penetração total e parcial, e soldadura de ângulo. No entanto, provas de soldadura de ângulo devem ser requeridas onde esta for predominante na soldadura em produção;
 - Seria recomendável a empresa dotar-se de um procedimento de soldadura com a utilização do processo 121 (arco-submerso) numa junta em T.
-

WPS 048-4

- Verifica-se a mesma condição relativamente à qualificação do tipo de junta da WPS 048-3. No entanto, a empresa já se fez dotar dos meios necessários para resolver esta situação.
-

Geral

- As WPS não qualificam soldadura de chapas de espessura de 12, 70 e 100 mm. A empresa já se fez dotar dos meios necessários para corrigir a lacuna existente relativamente às espessuras de 70 e 100 mm;
 - Não existem WPS realizadas para a soldadura de conetores. No entanto, existem as WPQR necessárias para a sua realização, uma vez que, segundo a norma ISO 14555 [109], dois procedimentos com diferentes diâmetros qualificam a soldadura de conetores de todos os diâmetros entre ele.
-

Assim, tendo presente as melhorias descritas na Tabela 14 e através meios disponíveis, ou seja, as WPQR da empresa, foram realizadas as WPS presentes no ANEXO 5 – Folhas de operação como alternativa às WPS da empresa. As WPRQ também são apresentadas no ANEXO 5 – Folhas de operação. Nos desenhos de fabrico, são as referências das WPS sugeridas que estão indicadas nos cordões de soldadura. Na Figura 76, Figura 77 e Figura 78 são ilustradas algumas das soldaduras realizadas através dos procedimentos utilizados.

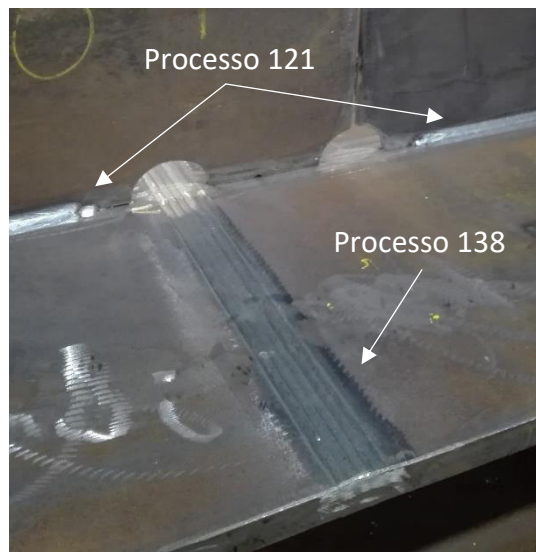


Figura 76 – Soldadura da emenda de uma viga

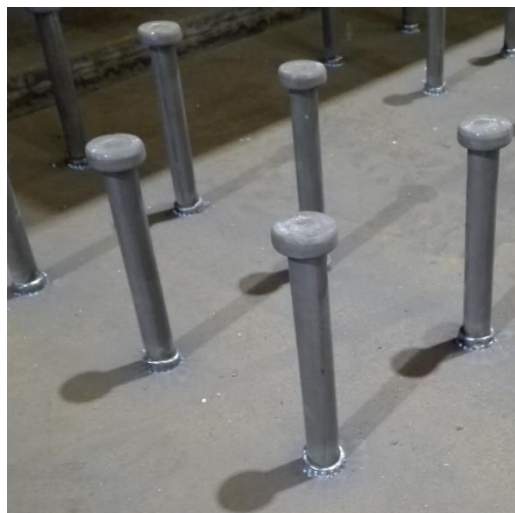


Figura 77 – Soldadura de conetores (Processo 783)



Figura 78 – Soldadura dos cachorros (Processo 138)

- **Procedimentos de pintura**

A operação de pintura foi um serviço subcontratado e, por isso, a empresa responsável pela sua execução teve liberdade para escolher os procedimentos aplicados, desde que no final garantisse a qualidade pretendida pelo cliente e respeitasse os prazos de entrega. Para isso, apenas foi indicado ao subempreiteiro o esquema de pintura e de aplicação que deveria utilizar. De forma a assegurar a qualidade pretendida, foi necessária a aprovação por parte do cliente do subempreiteiro e da marca dos revestimentos, tendo estes de ser produzidos pelo mesmo fabricante, chegando-se a acordo para a aplicação dos seguintes revestimentos:

- Hempel – Hempadur avantguard 550;
- Hempel – Hempadur fast-dry 17410/12430;
- Hempel - Hempthane topcoat 55210.

O esquema de pintura aplicado a toda a estrutura metálica da ponte foi:

- Decapagem a jato abrasivo ao grau SA 2,5;
- Aplicação de um primário de epóxi rico em zinco numa camada com espessura mínima de 50 μm ;
- Aplicação de um intermédio epóxi com fero micáceo numa camada com espessura mínima de 110 μm ;
- Tinta de acabamento poliuretano alifático em duas fases:
 - 1 camada com 50 μm de espessura mínima em oficina;
 - 1 camada com 50 μm de espessura mínima após o lançamento incremental da estrutura metálica, exceto nas partes superior e laterais dos banzos superior das longarinas, que deverão ter acabamento final em oficina.

O esquema de aplicação de pintura detalhou a forma como foi aplicado o esquema de pintura nas diferentes peças e conjuntos. Nestes esquemas são identificadas zonas que propositadamente não têm tratamento térmico. Isto deve-se ao facto de que são locais onde se irá aplicar um procedimento de soldadura em obra. Como exemplo, na Figura 79 e Figura 80 encontram-se dois esquemas de aplicação de pintura utilizados.

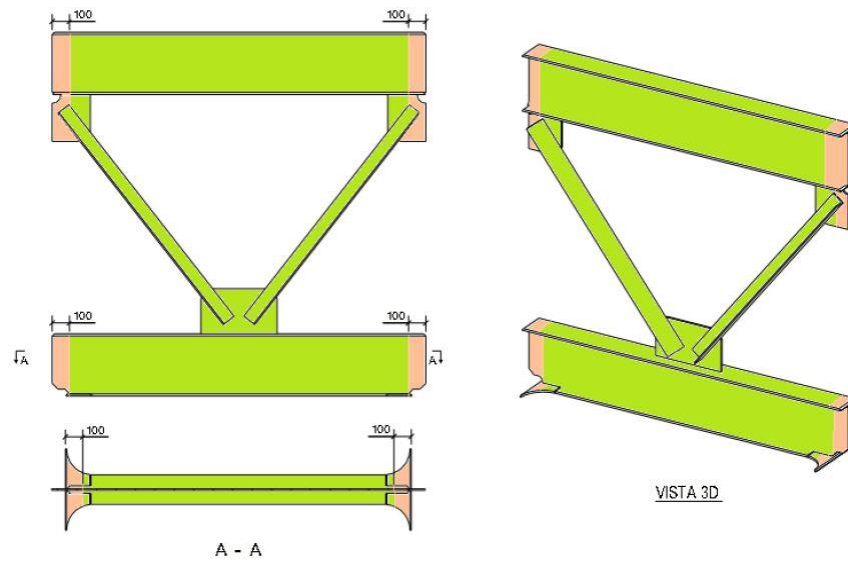


Figura 79 – Esquema de aplicação de pintura nas carlingas

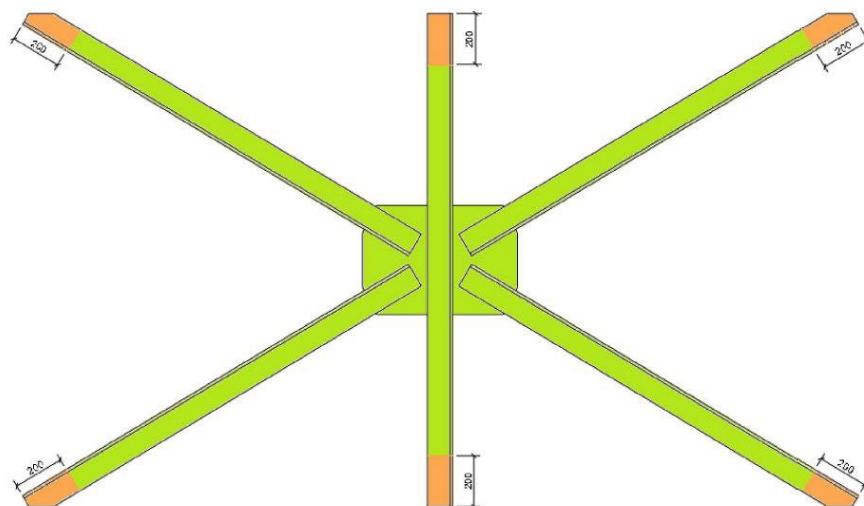


Figura 80 – Esquema de aplicação de pintura nos travamentos

As cores apresentadas nas figuras correspondem a cada etapa de aplicação do esquema de pintura, sendo que a decapagem é realizada em toda a estrutura. A cor laranja representa as zonas sem tratamento, a cor azul as zonas para aplicação do primário e do intermédio, e a cor verde as zonas de aplicação do acabamento. No ANEXO 5 – Folhas de operação encontram-se todos os esquemas utilizados. Uma característica importante dos conjuntos e peças é a área de pintura, já que foi através desta particularidade que se conseguiu controlar os custos associados ao trabalho desenvolvido pelo subempreiteiro. Na Tabela 15 são apresentadas as áreas de pintura dos conjuntos.

Tabela 15 – Área de pintura dos conjuntos e peças para pintura

| Referência | Área de pintura [m ²] | Referência | Área de pintura [m ²] |
|------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|
| V119 | 88,39 | V157 | 107,47 |
| V123 | 172,95 | V159 | 120,10 |
| V127 | 133,74 | V122 | 86,39 |
| V139 | 110,08 | V125 | 172,95 |
| V143 | 106,71 | V130 | 133,74 |
| V147 | 86,39 | V136 | 106,83 |
| V151 | 168,19 | V144 | 109,98 |
| V155 | 133,74 | V150 | 86,39 |
| V158 | 110,08 | V152 | 168,19 |
| V161 | 106,71 | V153 | 133,74 |
| V120 | 52,87 | V160 | 106,83 |
| V121 | 52,99 | V162 | 109,98 |
| V131 | 120,21 | TR4 | 4,04 |
| V133 | 107,42 | CAR14 | 7,45 |
| V135 | 107,47 | CAR15 | 7,44 |
| V141 | 120,10 | CAR16 | 7,43 |
| V148 | 52,87 | CAR17 | 7,44 |
| V149 | 52,99 | E26 | 14,53 |
| V154 | 120,21 | E32 | 3,86 |
| V156 | 107,42 | --- | --- |

3.4.4.5 Análise FMEA

Com o objetivo de analisar os processos de fabrico necessários à realização da estrutura metálica da ponte, recorreu-se a uma análise FMEA de processo para perceber quais as falhas que poderiam ocorrer durante o fabrico em oficina. A análise realizou-se com base na obra em estudo, no entanto, devido à semelhança com outras atividades fabris que a empresa desenvolve poderá ser aplicada a qualquer outra obra. Com a realização da análise FMEA tentou-se responder às seguintes questões: o que pode falhar?; como pode falhar?; que efeito provoca? e qual a causa?. Na realização desta análise FMEA de processo deu-se principal importância a falhas que poderiam causar problemas estruturais, tendo-se deixado de lado, por exemplo, defeitos de soldadura com cariz estético. Na Figura 81, Figura 82 e Figura 83 apresentada a análise FMEA realizada a etapas e processos desenvolvidos em oficina.

| ISEP METALONGO | | Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) | | | | FMEA nº: 1 Obra: Ponte ferroviária sobre o rio Shire Processo: --- Elaborado por: Rafael Azevedo | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------|--|------------|--|---------|-----|---|
| O que pode falhar? | Modo potencial de falha | Efeitos potenciais de falha | Gravidade | Causas potenciais de falha | Ocorrência | Ações preventivas propostas | Deteção | NPR | Ações recomendadas |
| Matéria-prima | Encomenda de produtos com defeitos. | Não conformidade dos conjuntos montados. | 8 | Fornecimento do matéria-prima. | 1 | Verificar o certificado de qualidade do material. | 8 | 64 | Trocar de fornecedor se o erro for persistente. |
| Desenhos de fabrico | Erros no modelo 3D. | Emissão dos desenhos de fabrico com erros; Produção de peças com erros dimensionais; Não conformidade dos conjuntos montados. | 8 | Desatenção do colaborador no processo de criação do modelo 3D. | 2 | Confirmação regular do trabalho desenvolvido com os desenhos do cliente. | 3 | 48 | --- |
| Equipamentos fabris | Avaria dos equipamentos. | Paragem do fabrico. | 9 | Manutenção deficiente ou inexistência do equipamento. | 3 | Manter os equipamentos limpos e oleados, se assim for necessário. | 4 | 108 | Aplicar um plano de manutenção preventiva aos equipamentos. |
| Movimentação de peças ou conjuntos | Queda do material. | Material danificado; Pode causar feridos. | 9 | Má fixação do material à ponte rolante; Choque do material com a estrutura do pavilhão ou de outros elementos presentes no interior da oficina. | 2 | Verificar a fixação do material antes de iniciar a sua movimentação; Manter o material a uma altura baixa para que possa ser controlado por um colaborador. | 4 | 72 | --- |

Figura 81 – Análise FMEA a etapas importantes ao fabrico

| | | | | | | | | | |
|-----------|---|--|---|---|---|---|---|-----|-----|
| Soldadura | Aparecimento de distorções geométricas. | Não conformidade dos conjuntos montados; Peças para sucata. | 8 | Inexperiência do soldador; Procedimento de soldadura incorreto; Chanfro incorreto. | 6 | Utilização de <i>gabaritis</i> ; Aplicar uma pré-deformação às peças; Ajustar o procedimento de soldadura e/ou a geometria do chanfro. | 3 | 144 | --- |
| | Desalinhamento das peças. | Não conformidade dos conjuntos montados; Peças para sucata. | 8 | Inexperiência do soldador; Posicionamento incorreto das peças a soldar. | 3 | Garantir a correta fixação das peças sem provocar empenos; Escolha adequado do chanfro. | 3 | 72 | --- |
| | Falta de preenchimento. | Não conformidade dos conjuntos montados; Peças para sucata. | 8 | Inexperiência do soldador; Chanfro incorreto; Velocidade de soldadura demasiado alta. | 3 | Ajustar do chanfro e da junta de soldadura; Ajustar o procedimento de soldadura. | 3 | 72 | --- |
| | Mordeduras e bordos queimados. | Não conformidade dos conjuntos montados; Peças para sucata. | 8 | Velocidade de soldadura demasiado alta; Demasiada entrega térmica; Taxa de deposição do material insuficiente; Fenómeno de sopro magnético. | 3 | Ajustar o procedimento e/ou a junta de soldadura; Posicionar corretamente os alicates de massa. | 3 | 72 | --- |
| | Inclusões de escória. | Fissuração da junta; Não conformidade dos conjuntos montados; Peças para sucata. | 9 | Remoção deficiente da escória entre os passes de soldadura; Falta de cuidado e/ou experiência do soldador; Procedimento de soldadura incorreto. | 3 | Limpar a junta de soldadura entre os passes; Ajustar o procedimento e/ou a junta de soldadura. | 6 | 162 | --- |
| | Porosidades. | Formação de vazios na zona do cordão de soldadura. | 8 | Técnica de soldadura deficiente; Má preparação da junta de soldadura; Utilização de eletrodos danificados ou húmidos; Velocidade de soldadura demasiado elevada. | 3 | Manter os consumíveis guardados em locais secos (estufas); Proteger o banho de fusão; Limpar corretamente a junta de soldadura; Ajustar o procedimento de soldadura. | 4 | 96 | --- |
| | Falta de fusão. | Ausência de fusão entre o material de adição e de base. | 9 | Entrega térmica insuficiente; Procedimento de soldadura incorreto; Fracá preparação da junta de soldadura; Fenómeno de sopro magnético. | 3 | Ajustar o procedimento de soldadura; Limpar corretamente a junta de soldadura. | 5 | 135 | --- |
| | Fissuração. | Rotura local no cordão de soldadura. | 9 | Capacidade limitada do material relaxar as tensões acumuladas; Presença de hidrogénio no cordão de soldadura. | 3 | Manter os consumíveis guardados em locais secos (estufas); Limpeza adequada da junta de soldadura; Controlar o arrefecimento da peça após a soldadura; | 6 | 162 | --- |

Figura 82 – Análise FMEA ao processo de soldadura desenvolvido em oficina

| | | | | | | | | | |
|-------|--|---|---|--|---|--|---|-----|---|
| Corte | Vibração da máquina de corte. | Peças produzidas com defeitos geométricos. | 4 | Montagem deficiente da máquina. | 3 | Calibração regular da máquina. | 4 | 48 | Se o problema persistir, chamar a assistência do equipamento em questão. |
| | Peça cortada não corresponde ao desenho. | Peça para a sucata. | 8 | Programa de corte incorreto; Utilização da matéria-prima incorreta. | 3 | Verificar a correspondência do número do programa com a folha de operação de corte; Verificação das dimensões da matéria-prima; Verificação das condições dos colaboradores. | 5 | 120 | Verificar se é possível reaproveitar a peça para a realização de outra. |
| | Matéria-prima insuficiente. | Necessidade de encomendar mais material; Possível aumento do desperdício de material. | 4 | O plano de corte foi mal elaborado ou não foi respeitado; Posicionamentos incorreto das chapas ou perfis na mesa de corte. | 5 | Verificar o posicionamento da matéria-prima na mesa de corte antes de iniciar o processo. | 5 | 100 | Sensibilizar os colaboradores para respeitarem os planos de corte elaborados. |
| | Qualidade de corte insuficiente. | Peça para a sucata. | 8 | Utilização da matéria-prima incorreta; Utilização de consumíveis desgastados. | 5 | Verificação das dimensões da matéria-prima; Verificação dos consumíveis instalados. | 3 | 120 | Verificar se é possível reaproveitar a peça para a realização de outra. |

Figura 83 – Análise FMEA ao processo de corte desenvolvido em oficina

A análise FMEA realizou-se com base na descrição realizada no subcapítulo 2.3.3.3, tendo-se utilizado a Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 como referências para a atribuição dos índices de gravidade, ocorrência e detecção.

Como já foi referido anteriormente, quanto mais elevado for o índice de NPR, maior deverá ser a concentração de esforços para impedir a ocorrência da falha. Neste caso, os índices NPR mais elevados estão associados maioritariamente a falhas que tenham como efeito a não conformidade dos conjuntos, a sucata não prevista e que possam ocorrer durante o processo de soldadura. O índice de gravidade nas falhas deste processo é elevado, pois estes têm uma grande influência a nível estrutural, e a não deteção destas falhas pode levar à rotura da estrutura. No entanto, o índice de ocorrência das causas que potenciam estas falhas é baixo. Isto deve-se ao facto de a empresa ser bem qualificada tanto a nível de soldadores como de procedimentos de soldadura. A análise FMEA foi concretizada tendo em consideração as operações realizadas dentro da oficina e tendo a estrutura uma operação de montagem em obra, as falhas acima descritas relativamente à operação de soldadura poderão ter o seu índice de ocorrência aumentado.

3.4.5 Controlo de qualidade

O controlo de qualidade do fabrico da estrutura metálica da ponte foi assegurado por três operações de controlo, o dimensional, de soldadura e de pintura. O caderno de encargos da obra descreve sumariamente as condições de qualidade que são exigidas e as normas que foram respeitadas, como se pode perceber nos próximos subcapítulos. Antes de se ter iniciado qualquer operação de fabrico, foi submetido ao cliente o PIE para aprovação. O PIE realizado contempla por exigência do cliente todas as ações de inspeção durante as

operações de fabrico e montagem, e também os critérios de aceitação. No ANEXO 6 – Plano de inspeção e ensaios é apresentado o PIE desenvolvido e aplicado para o fabrico da estrutura da ponte. Após o término de todas as operações de fabrico e montagem foi entregue ao cliente o registo de garantia da qualidade que incluiu:

- Desenhos de fabrico;
- Desenhos de soldadura;
- Certificados dos soldadores envolvidos no fabrico;
- Especificações dos procedimentos de soldadura utilizados (WPS);
- Certificados do material, incluindo os relatórios de ensaios;
- Plano de inspeção e ensaios;
- Relatórios relacionados com os ensaios de controlo de qualidade, incluindo relatórios de não conformidades;
- Relatórios de calibração dos equipamentos de medida;
- Relatórios internos e externos relacionados com as auditorias do sistema de garantia de qualidade.

3.4.5.1 Controlo dimensional

Segundo os requisitos do cliente, o controlo dimensional realizado respeitou a norma EN 1090-2. Relativamente à tolerância geométrica adotou-se o critério alternativo descrito na norma referida anteriormente. No que diz respeito a estruturas soldadas, este critério remete para as especificações da classe C de dimensões lineares descritas na norma EN ISO 13920. Contudo, a empresa adotou um critério de tolerância mais apertado, mas que respeita as exigências normativas. Os valores de tolerância utilizados encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Tolerânciamento geométrico

| Dimensão [mm] | Tolerância (mm) |
|---------------|-----------------|
| < 500 | ± 1 |
| < 8000 | ± 3 |
| < 12000 | ± 4 |
| < 16000 | ± 6 |
| ≥ 16000 | ± 8 |

A aplicação do controlo de qualidade foi realizada da forma descrita na sequência de fabrico, após os procedimentos de corte e no fim da operação de soldadura, e para a sua execução, recorreu-se a uma fita métrica. Para a confirmação das dimensões e aplicação das tolerâncias adotadas utilizaram-se os desenhos de fabrico presentes no ANEXO 3 – Desenhos de fabrico. Os documentos que comprovam a conformidade dos conjuntos encontram-se no ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade. Pela observação destes relatórios pode-se verificar que não existiram não conformidades

3.4.5.2 Controlo de soldadura

Relativamente ao controlo de soldadura, o caderno de encargos impõe que se realizem os seguintes ensaios:

- Cordões com penetração total em chapas com espessura acima de 12 mm requerem a realização do ensaio de ultrassons a 100%;
- Os restantes cordões requerem a realização do ensaio de líquidos penetrantes ou do ensaio de partículas magnéticas a 35% das soldaduras efetuadas em oficina e a 65% da soldadura efetuada no local da obra;
- O caderno de encargos define que se realizem os ensaios de *bend test* e de *tensile testing* para a soldadura realizada em conetores. Segundo a norma EN ISO 14555, para conetores com diâmetro superior a 12 mm e com uma temperatura de aplicação igual ou inferior a 100°C, o *bend test* deve ser realizado a 10 conetores e o *tensile testing* a 5 conetores.

A realização dos ensaios descritos foram realizados por uma entidade externa como é indicado no PIE da obra. Por indicação do caderno de encargos, o subcontratado deve respeitar as normas EN ISO 17637:2011, EN ISO 5817, EN ISO 23278, EN ISO 11666 e a EN ISO 14555 para a execução dos ensaios descritos. O controlo de qualidade foi realizado após o controlo dimensional, como é indicado na sequência de fabrico, e foi dividido em diversas etapas. O subcontratado responsável pelo controlo de soldadura era contactado sempre que existia uma quantidade de conjuntos que fosse justificável. Este gerenciamento de operações foi importante porque permitiu a libertação fluída de conjuntos para a operação de pintura, libertando assim uma quantidade de espaço necessário na oficina para a continuação da realização dos trabalhos desta e de outras obras. Os relatórios emitidos pela empresa subcontratada encontram-se no ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade. Pela análise destes documentos, verifica-se que todas as soldaduras tiveram a nota de aceitável. Na Figura 84 e Figura 85 são ilustrados dois conjuntos após o decorrer do ensaio de partículas magnéticas.



Figura 84 – Ensaio de partículas magnéticas numa viga



Figura 85 – Ensaio de partículas magnéticas numa carlinga

3.4.5.3 *Controlo de pintura*

Para o controlo de qualidade foi exigido o teste de espessura de filme seco. No que diz respeito aos critérios de aceitação, o cliente impõe que a espessura do revestimento seja no mínimo de 70% da recomendada junto das arestas e, se necessário, proceder-se à aplicação de mais camadas nestas áreas e nas juntas de soldadura. Também é

recomendado adotar um sistema de medições no qual estas são realizadas em 5 cinco pontos diferentes numa área de, aproximadamente, 10 m². Por outro lado, cada medição pontual é a média de três leituras próximas umas das outras, que deve ser de pelo menos 80% da espessura especificada. A média das 5 medições pontuais deverá estar acima da espessura requerida. As espessuras a ter como referência são as que já foram referidas no procedimento de pintura descrito no subcapítulo 3.4.4.4. Como já foi referido, a pintura foi um serviço subcontratado e, por isso, foi necessária a comprovação da sua qualidade. Para isso, foi realizado um ensaio *pull-off* por uma entidade externa ao subcontratado. Este ensaio foi realizado numa chapa pintada com o mesmo esquema e procedimento que a estrutura da ponte. No ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade é apresentado o relatório emitido que comprova a qualidade do serviço prestado. Durante a execução da operação de pintura, foi requerido ao subempreiteiro que realizasse um registo da aplicação do revestimento, de forma a garantir que as espessuras especificadas fossem realmente aplicadas. Juntamente com os registos aplicação de camadas, são também apresentados os resultados dos testes de espessura de filme seco e de espessura de filme húmido. Os ensaios foram realizados através dos procedimentos descritos nas normas EN ISO 8501-1, EN ISO 8501-1/3, EN ISO 12944 e EN ISO 2409.

Durante o período de garantia, que não deve ser inferior a 5 anos, o revestimento aplicado na estrutura metálica não deve apresentar alterações significativas na sua aparência e deve cumprir as exigências estabelecidas na norma EN ISO 4628, com a seguinte avaliação da degradação do revestimento:

- Enferrujamento --> Grau Ri0 – sem sinais de oxidação;
- Empolamento --> Qualidade 2 (S2) – poucos defeitos, já visíveis a olho nu;
- Fissuração --> Classificação 2 – pequenas fissuras, mas em quantidade significativa;
- Descamação --> Classificação 2 – perda de pequenas camadas de revestimento, mas em quantidade significativa.

A operação de controlo de pintura foi a última etapa do fabrico e, tendo-se obtido resultados satisfatórios nos ensaios, como se pode observar nos relatórios presentes no ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade, as vigas encontravam-se prontas para a expedição para o Malawi.

3.4.6 Transporte de materiais e equipamentos

Com as características da obra em estudo foram necessários três fases de transporte: a primeira ocorre no interior da oficina com a movimentação das peças e conjuntos para os postos onde são necessários, a segunda dá-se com o transporte dos conjuntos para a oficina do subempreiteiro contratado para realizar a operação de pintura, e a terceira ocorre desde as instalações da Metalongo ou do subempreiteiro de pintura até chegar ao local da obra.

A operação de transporte realizada dentro da oficina é a mais simples de todas e essencial para a realização dos processos de fabrico. Esta movimentação de peças é realizada através de pontes rolantes com uma capacidade de carga de 5 e 10 toneladas. Também se recorreu a pequenos pórticos dotados de equipamentos de elevação para o deslocamento de peças e conjuntos mais leves, libertando assim as pontes rolantes para outros trabalhos.

Para conseguir a organização dos transportes da segunda e terceira fase foi importante a realização de uma lista de expedição dos conjuntos e peças. Esta lista indica a quantidade e as dimensões do material a expedir. Isto facilitou a perceção dos meios de transporte terrestres necessários tendo em conta o decreto-Lei n.º 132/2017 de 11 de outubro [110], que indica os pesos e as dimensões máximas autorizadas para os veículos em circulação. A lista de expedição inclui a informação presente na Tabela 17.

Tabela 17 – Informação para a lista de expedição

| Referência | Quant. | Fase de expedição | Peso [kg] | Comprimento [mm] | Largura [mm] | Altura [mm] |
|------------|--------|-------------------|-----------|------------------|--------------|-------------|
| V119 | 1 | 1ª Fase | 11769,9 | 8498 | 1200 | 2598 |
| V123 | 1 | 1ª Fase | 16463,0 | 15649 | 2032 | 2598 |
| V127 | 1 | 1ª Fase | 12163,4 | 12998 | 1200 | 2598 |
| V139 | 1 | 1ª Fase | 10342,4 | 10998 | 1200 | 2598 |
| V143 | 1 | 1ª Fase | 19526,4 | 10498 | 1200 | 2598 |
| V147 | 1 | 1ª Fase | 11769,9 | 8498 | 1200 | 2598 |
| V151 | 1 | 1ª Fase | 16035,7 | 15649 | 1200 | 2598 |
| V155 | 1 | 1ª Fase | 12163,4 | 12998 | 1200 | 2598 |
| V158 | 1 | 1ª Fase | 10342,4 | 10998 | 1200 | 2598 |
| V161 | 1 | 1ª Fase | 19526,4 | 10498 | 1200 | 2598 |
| V120 | 1 | 2ª Fase | 7275,8 | 5498 | 1200 | 2598 |
| V121 | 1 | 2ª Fase | 7280,7 | 5498 | 1200 | 2598 |
| V131 | 1 | 2ª Fase | 11314,2 | 11998 | 1200 | 2598 |
| V133 | 1 | 2ª Fase | 9812,3 | 10748 | 1200 | 2598 |

| | | | | | | |
|-------|----|---------|---------|-------|------|------|
| V135 | 1 | 2ª Fase | 9900,7 | 10748 | 1200 | 2598 |
| V141 | 1 | 2ª Fase | 11297,1 | 11998 | 1200 | 2598 |
| V148 | 1 | 2ª Fase | 7275,8 | 5498 | 1200 | 2598 |
| V149 | 1 | 2ª Fase | 7280,7 | 5498 | 1200 | 2598 |
| V154 | 1 | 2ª Fase | 11314,2 | 11998 | 1200 | 2598 |
| V156 | 1 | 2ª Fase | 9812,3 | 10748 | 1200 | 2598 |
| V157 | 1 | 2ª Fase | 9900,7 | 10748 | 1200 | 2598 |
| V159 | 1 | 2ª Fase | 11297,1 | 11998 | 1200 | 2598 |
| V122 | 1 | 3ª Fase | 11769,8 | 8498 | 1200 | 2598 |
| V125 | 1 | 3ª Fase | 16462,9 | 15649 | 2032 | 2598 |
| V130 | 1 | 3ª Fase | 12163,3 | 12998 | 1200 | 2598 |
| V136 | 1 | 3ª Fase | 19531,3 | 10498 | 1200 | 2598 |
| V144 | 1 | 3ª Fase | 10326,0 | 10998 | 1200 | 2598 |
| V150 | 1 | 3ª Fase | 11769,8 | 8498 | 1200 | 2598 |
| V152 | 1 | 3ª Fase | 16035,6 | 15649 | 1200 | 2598 |
| V153 | 1 | 3ª Fase | 12163,3 | 12998 | 1200 | 2598 |
| V160 | 1 | 3ª Fase | 19531,3 | 10498 | 1200 | 2598 |
| V162 | 1 | 3ª Fase | 10326,0 | 10998 | 1200 | 2598 |
| TR4 | 33 | 1ª Fase | 183,7 | 3285 | 1940 | 112 |
| CAR14 | 10 | 1ª Fase | 295,2 | 2156 | 2100 | 470 |
| CAR15 | 6 | 1ª Fase | 294,6 | 2152 | 2100 | 470 |
| CAR16 | 4 | 1ª Fase | 294,2 | 2150 | 2100 | 470 |

| | | | | | | |
|-------|-----|--------|--------|------|------|------|
| CAR17 | 12 | 1ªFase | 295,1 | 2154 | 2100 | 470 |
| E26 | 2 | 1ªFase | 1317,2 | 2130 | 800 | 1150 |
| E32 | 4 | 1ªFase | 555,3 | 2306 | 814 | 40 |
| C1 | 8 | 1ªFase | 4,5 | 500 | --- | --- |
| C2 | 3 | 1ªFase | 4,9 | 622 | --- | --- |
| C41 | 3 | 1ªFase | 4,9 | 622 | --- | --- |
| CON1 | 250 | 1ªFase | 0,4 | 150 | --- | --- |

Como já foi referido anteriormente, a operação de pintura foi um serviço subcontratado e, por isso, é necessário fazer chegar as peças à sua oficina tendo-se recorrido ao meio de transporte rodoviário realizado por camiões. Sempre que na oficina de fabrico existissem conjuntos com aprovação dos controlos dimensional e de soldadura e que justificassem em termos dimensionais a realização de um transporte, era feito um contacto com uma transportadora para a realização do serviço. Tendo presente tudo o que foi descrito anteriormente e a Tabela 17 foram realizados os transportes presentes na Tabela 18.

Tabela 18 – Transportes realizados da Metalongo para a oficina de pintura

| Data | Referência dos conjuntos / peças expedidas | Peso da carga [kg] |
|------------|--|--------------------|
| 27/12/2018 | 33xTR4 | 6062,1 |
| 03/01/2019 | 1xCAR14; 6xCAR15; 4xCAR16; V151 | 19275,3 |
| | V123 | 16463,0 |
| 04/01/2019 | V127 | 12163,4 |
| 09/01/2019 | V155 | 12163,4 |
| 10/01/2019 | V139 | 10342,4 |
| | V158 | 10342,4 |
| 11/01/2019 | V119 | 11769,9 |

| | | |
|------------|-------------------|---------|
| 15/01/2019 | V147 | 11769,9 |
| 16/01/2019 | V143 | 19526,4 |
| 17/01/2019 | V161 | 19526,4 |
| 19/01/2019 | V131 | 11314,2 |
| 24/01/2019 | 9xCAR14; 12xCAR17 | 6198,0 |
| 26/01/2019 | V141 | 11297,1 |
| | V120; V121 | 10996,0 |
| 05/02/2019 | V133; V135 | 19713,0 |
| | V154 | 11314,2 |
| 06/02/2019 | V156 | 9812,3 |
| | V157 | 9900,7 |
| 07/02/2019 | V148; V149 | 10996,0 |
| 08/02/2019 | V159; E26; E32 | 16152,7 |
| 16/02/2019 | V136 | 19531,3 |
| 18/02/2019 | V160 | 19531,3 |
| 23/02/2019 | V122 | 11769,8 |
| 26/02/2019 | V125 | 16462,9 |
| 27/02/2019 | V130 | 12163,3 |
| | V144; V162 | 20652,0 |
| 01/03/2019 | V150 | 11769,8 |
| 07/03/2019 | V152 | 16035,6 |
| | V153 | 12163,3 |

A concretização das cargas apresentadas foi conseguida através de 30 camiões com as seguintes dimensões de transporte: 12 m de comprimento, 2,55 m de largura e 4 m de altura. Na Figura 86 são demonstrados dois exemplos do acondicionamento de duas cargas.



Figura 86 – Exemplo do acondicionamento de duas cargas

Para a realização da terceira fase de transporte recorreu-se a dois tipos de transporte, o terrestre através de camiões e o marítimo através de barco. Nesta fase, para além da expedição dos conjuntos e peças fabricadas realizou-se também a expedição de equipamentos e materiais necessários à montagem da estrutura em obra. A lista destes equipamentos e materiais encontra-se presente no ANEXO 8 – Listas de expedição de conjuntos, peças e equipamentos. Devido ao transporte marítimo torna-se necessário acondicionar a carga em contentores, tendo-se optado pela opção *open top* de 40 polegadas com as seguintes dimensões interiores e carga máxima:

- Comprimento: 12,028 m;
- Largura: 2,350 m;
- Altura: 2,345 m;
- Carga máxima: 26630 kg.

No entanto, existem vigas que, devido ao seu comprimento, optou-se pelo transporte convencional marítimo por ser mais vantajoso em termos de custos finais. As vigas com um comprimento superior a 12 m ou com um peso superior a 19 ton (V123, V125, V127, V130, V151, V152, V153 e V155) foram transportadas como carga convencional, sendo as restantes vigas transportadas nos contentores descritos anteriormente. Após o primeiro contacto com a transportadora, foram dadas como opções de destino da carga os portos da Beira e de Maputo. Com a realização de um pequeno estudo, tomando em consideração os prazos a cumprir e os custos associados, optou-se por escolher como destino o porto da Beira para a carga em contentores e o porto de Maputo para a carga convencional. O transporte desde o porto de Leixões até ao porto da Beira teve uma duração aproximada de 51 dias, enquanto para o porto de Maputo a duração foi de aproximadamente 41 dias. A movimentação de carga expedida desde a Metalongo ou da oficina de pintura até ao porto de Leixões e desde o porto da Beira e de Maputo até ao local da obra foi realizada

através de transporte terrestre (camiões), sendo que o acondicionamento da carga em contentores é realizado no seu ponto de partida. A Tabela 19 descreve de forma resumidamente o transporte marítimo.

Tabela 19 – Descrição do transporte marítimo

| Carga | 1ª Fase | 2ª Fase | 3ª Fase |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Contentores (porto da Beira) | 5 contentores | 5 contentores | 3 contentores |
| Convencional (porto de Maputo) | 6 vigas | --- | 6 vigas |

No ANEXO 8 – Listas de expedição de conjuntos, peças e equipamentos é apresentada a distribuição realizada da carga expedida. A Tabela 20 apresenta as cargas realizadas desde a Metalongo ou da oficina de pintura para o porto de Leixões. Para fazer chegar a carga desde os portos da Beira e de Maputo até ao local da obra foi utilizado o esquema apresentado na Tabela 20. De forma a não danificar a carga, o seu acondicionamento foi cuidadoso, tendo-se aplicado alguns princípios básicos descritos no subcapítulo 2.3.6, como colocar os materiais mais leves por cima dos mais pesados e evitar o contacto entre os materiais. Na Figura 87 é possível observar alguns dos cuidados tidos durante o acondicionamento da carga.

Tabela 20 – Transportes realizados para o porto de Leixões.

| Data | Fase | Lista de expedição | Local da carga |
|------------|---------|---|---------------------------------|
| 04/02/2019 | 1ª fase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº1 Contentor 40' <i>Open top</i> nº2 | Oficina de pintura |
| 05/02/2019 | 1ª fase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº3 | Oficina de pintura |
| 06/02/2019 | 1ª fase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº4 Contentor 40' <i>Open top</i> nº5 | Oficina de pintura Metalongo |
| 15/02/2019 | 2ª fase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº6 | Oficina de pintura |
| 25/02/2019 | 1ª fase | Convencional nº1 (V127 / V155) Convencional nº1 (V123) | Oficina de pintura |
| 26/02/2019 | 1ª fase | Convencional nº1 (V143) Convencional nº1 (V151) Convencional nº1 (V161) | Oficina de pintura |

| | | | |
|------------|------------------|---|---------------------------------|
| 08/03/2019 | 2ªfase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº7 | Oficina de pintura |
| 25/03/2019 | 3ªfase | Convencional nº2 (V125) Convencional nº2 (V152) Convencional nº2 (V136) | Oficina de pintura |
| 28/03/2019 | 3ªfase | Convencional nº1 (V130 / V153) Convencional nº1 (V160) | Oficina de pintura |
| 05/04/2019 | 2ªfase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº8 Contentor 40' <i>Open top</i> nº9 | Oficina de pintura |
| 12/04/2019 | 2ªfase 3ªfase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº10 Contentor 40' <i>Open top</i> nº13 | Oficina de pintura Metalongo |
| 24/04/2019 | 3ªfase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº11 | Oficina de pintura |
| 26/04/2019 | 3ªfase | Contentor 40' <i>Open top</i> nº12 | Oficina de pintura |



Figura 87 – Acondicionamento da carga

3.4.7 Montagem da estrutura

A montagem da estrutura, sendo a última etapa do projeto, esteve sempre dependente de como decorreriam os trabalhos que a antecederam. No ANEXO 1 – Plano de trabalhos é apresentado um plano cronológico dos trabalhos a desenvolver, sendo que na etapa de montagem a descrição é bastante geral. Com o aproximar do fim dos trabalhos desenvolvidos em oficina procedeu-se à execução de um plano mais detalhado para esta última etapa, já com os acertos necessários nas datas, como se pode observar na Figura 88.



Figura 88 – Plano de trabalhos para a fase de montagem

Para a execução da fase de montagem em obra, foram necessários recursos de diversas etapas descritas até ao momento. A montagem da estrutura foi conseguida através dos seguintes desenhos presentes no ANEXO 3 – Desenhos de fabrico:

- Desenho de montagem da 1ª fase [A2-P2] (desenho nº1);
- Desenho de montagem da 2ª fase [P2-P1] (desenho nº2);
- Desenho de montagem da 3ª fase [P1-A1] (desenho nº3);
- Desenho geral de soldadura (desenhos nº 4 e 5).

A execução do processo de soldadura respeitou as especificações estabelecidas nas WPS aprovadas previamente pelo cliente e presentes no ANEXO 5 – Folhas de operação. No entanto, nos desenhos de fabrico são identificadas as WPS realizadas como alternativa às utilizadas, como já foi referido no subcapítulo 3.4.4.4. Relativamente ao processo de pintura, foram utilizados os mesmos revestimentos que em oficina, e respeitou-se o esquema de pintura aprovado anteriormente. Em relação ao esquema de aplicação, procedeu-se ao complemento das zonas onde não tinha sido aplicado o esquema de pintura a 100%, como é o caso das zonas a laranja e azul que se podem ver nos esquemas apresentados no ANEXO 5 – Folhas de operação.

Para a realização de todos os trabalhos de montagem, foram necessários diversos meios e equipamentos de elevação, como são exemplo as gruas com capacidade de 80 ton, as plataformas elevatórias e os andaimes. Além disto, para ajudar na execução dos trabalhos de soldadura e pintura, foram necessários cavaletes (Figura 89 - A) que ajudaram na sustentação das vigas servindo como mesa de trabalho, três tendas (Figura 89 - B) que

serviram para controlar o meio ambiente durante a execução dos processos de soldadura e todos os equipamentos, ferramentas e materiais descritos na lista de expedição do contentor 40' *Open top* nº5. A execução dos trabalhos de montagem só foi conseguida através de meios humanos, sendo necessários um diretor de obra, e dois montadores, cinco soldadores e um pintor.



Figura 89 – Exemplo de estruturas auxiliares necessárias: A- cavaletes; B - tendas

Dos métodos de montagem da uma estrutura de uma ponte foi definida pelo cliente a utilização do processo de lançamento incremental. A utilização deste método pode ser justificada devido às condições locais, nomeadamente, a largura e o fluxo do rio. Além disto, este método não requer equipamentos do tipo grua para a sua execução e reduz o risco de paragem dos trabalhos devido às condições do rio. Como já referido no subcapítulo 2.3.7, para a concretização deste processo de montagem é necessário libertar uma grande quantidade de espaço para montar totalmente a estrutura da ponte. Foi definido que a montagem da estrutura da ponte começaria de A2 para A1, o que implicou a libertação de um espaço de mais ou menos 180 m de comprimento na margem norte do rio Shire. A Figura 90 apresenta a vista aérea sobre a zona de montagem da estrutura da ponte.



Figura 90 – Vista aérea da zona de montagem da estrutura da ponte

Esta metodologia de montagem foi previamente desenvolvida e projetada para esta situação em específico, como são os casos do “nariz” de lançamento e do sistema de elevação da ponte. Os trabalhos relacionados com o lançamento incremental estiveram a cargo do empreiteiro da obra, sendo da responsabilidade da Metalongo o fabrico de estruturas auxiliares para a execução do método. Na Figura 91 são apresentadas algumas das principais estruturas fabricadas para o auxílio no processo do lançamento incremental.

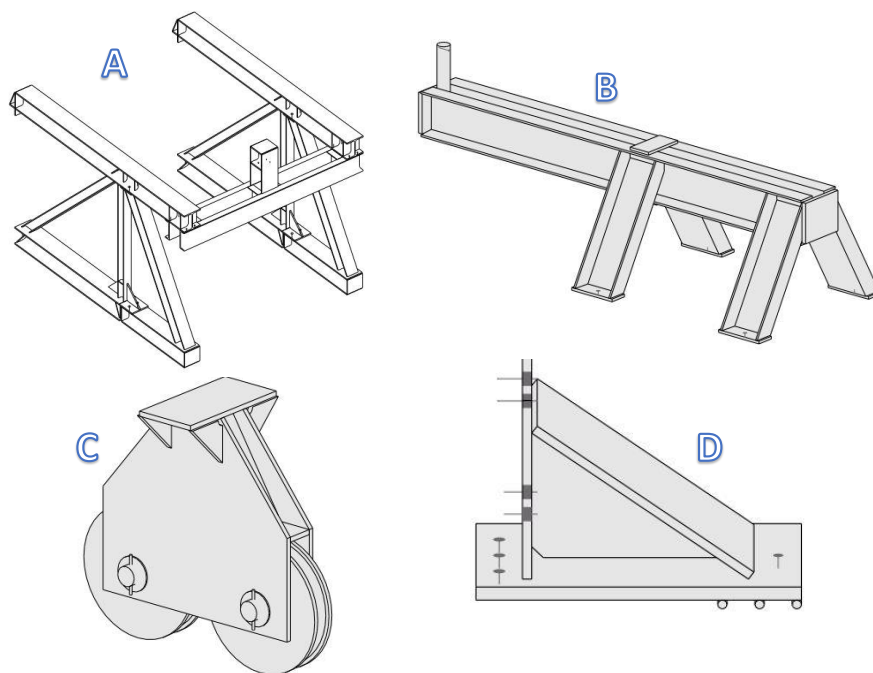


Figura 91 – Estruturas auxiliares fabricadas pela Metalongo: A – “nariz” de lançamento; B – Suporte para o sistema de elevação; C – Patim para fazer a estrutura deslizar; D – Guia lateral para a estrutura

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Terminadas todas as etapas previstas para a execução da gestão de projeto e produção da estrutura metálica em estudo, é importante fazer um balanço do cumprimento ou não dos objetivos impostos inicialmente. Relativamente ao plano de trabalhos, pode dizer-se que este foi cumprido na sua maioria, tendo o início dos trabalhos sofrido um atraso devido à demora na receção dos desenhos definitivos do cliente. Outro objetivo que estava inicialmente estipulado e que não foi cumprido foi o transporte dos materiais até o local da obra, devido às condições meteorológicas que afetaram gravemente aquela região, e que impediu que os barcos descarregassem o material nos respetivos portos. A otimização da estrutura foi uma etapa bem sucedida, tendo-se conseguido encontrar alterações que simplificaram e favoreceram a execução dos processos de fabrico sem que a componente estrutural fosse afetada. No que diz respeito ao fabrico da estrutura e mais em concretamente ao processo de corte, o plano realizado para a utilização de matéria-prima não se fez cumprir. Isto deveu-se ao facto deste processo ser realizado em simultâneo nos subempreiteiros contratados e na Metalongo, e também à utilização da mesma matéria-prima para cortar peças de diferentes fases. O não cumprimento dos planos de corte obrigou a uma nova reorganização do corte das peças de forma a não ser necessário encomendar mais matéria-prima, evitando assim o acréscimo dos custos e o desperdício de material. Apesar disto, todos os processos foram realizados com sucesso tendo-se obtido, em oficina, uma estrutura de qualidade, não existindo qualquer não conformidade nos controlos realizados. Por último, a fase de montagem teve as suas contrariedades devido aos atrasos sofridos no transporte e, mais recentemente, devido a um problema alheio à Metalongo, mas que obrigou à paragem da montagem da estrutura.

Relativamente a propostas de trabalhos futuros, seria importante a realização de uma análise FMEA de processo mais aprofundada, como também o alargamento deste tipo de análise a outros setores da empresa. Isto ajudaria a perceber em que setores e procedimentos são necessários mais cuidados de forma a minimizar os erros no trabalho desenvolvido em oficina. Além disso, também seria essencial encontrar uma estratégia para manter os processos subcontratados coordenados com os desenvolvidos na empresa.

Assim, pode-se concluir que, na sua maioria, os objetivos estipulados neste trabalho foram cumpridos, obtendo-se no final uma estrutura de qualidade e com capacidade para cumprir os requisitos para que foi projetada. No entanto, existe ainda uma margem para a correção e enriquecimento dos processos desenvolvidos pela empresa.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. *Valorizar a gestão de projeto*. 2018 [acedido em 29/08/2019]; Disponível em: <https://pontosdevista.pt/2018/05/07/valorizar-gestao-projeto/>.
2. Mateus, A. *Qual a Importância de Uma Gestão de Produção Eficiente?* 2016 [acedido em 29/08/2019]; Disponível em: <https://www.inforestilo.pt/blog/qual-a-importancia-de-uma-gestao-de-producao-eficiente.html>.
3. Rodrigues, B., Almeida, M.N.P. e Mendonça, J.T.P.P., *New Shire River Bridge - Memorandum*. 2017, Betar Consultors: Lisboa.
4. Pinto, J.M., *Manual do Formando - Gestão da Qualidade - Formação on-line*. 2002, Instituto Politécnico de Gestao e Tecnologia de Leiria: Leiria.
5. Rodrigues, B., Almeida, M.N.P. e Mendonça, J.T.P.P., *New Shire River Bridge - Technical Specifications*. 2017, Betar Consultors: Lisboa.
6. Buick, D. e Graham, W.O., *Steel Designers' Manual*. 6 ed. 2003, Nova Jersey: Blackwell Publishing.
7. Barros, I. *Alargamento da Ponte D. Luís I é a "solução mais doce"*. 2016 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://jpn.up.pt/2016/03/08/alargamento-da-ponte-d-luis-i-solucao-doce/>.
8. Calvin. *Everton confirmed to play in Algarve Cup*. 2018 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://royalbluemersey.sbnation.com/2018/6/26/17505172/everton-pre-season-schedule-algarve-cup-porto-losc-lille-gor-mahia-sportpesa-cup>.
9. *Silos de expedição*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <http://consilos.com.br/ptb/a-consilos/agroindustria/silos-de-expedicao>.
10. *Fotogaleria de Construção civil*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://pavifrance-pavimentos-ind-lda3.webnode.pt/fotogaleria-de-construcao-civil/>.
11. Aghayere, A. e Vigil, J., *Structural Steel Design*. 2008, Índia: Pearson.
12. *Forth Rail Bridge, Firth of Forth*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://www.railway-technology.com/projects/forth-rail-bridge-firth-scotland/>.
13. Duan, L. e Chen, W., *Bridge engineering handbook*. 1999, Florida: CRC Press.
14. Hurt, M. e Schrock, S.D., *Highway bridge maintenance planning and scheduling*. 2016, Oxford: Butterworth-Heinemann.
15. Silva, L.S. e Santiago, A., *Manual de ligações metálicas*. 2003, Coimbra: Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
16. Ghosh, U.K., *Design of welded steel structures: principles and practice*. 2015, Florida: CRC Press.
17. Silva, F.J.G., *Tecnologia da soldadura: Uma abordagem técnico-didática*. 2014, Porto: Publindustria.

18. *Advantages Of Bolted Connections*. 2018 [acedido em 19/03/2019]; Disponível em: <http://northern-weldarc.com/advantages-of-bolted-connections/>.
19. *Steel Frame Joints*. 2019 [acedido em 19/03/2019]; Disponível em: <http://ww9.onvacations.co/steel-frame-joints/>.
20. Kulak, G.L., Fisher, J.W. e Struik, J.H.A., *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints Second Edition*. 2001, Chicago: American Institute of Steel Construction.
21. *Bolts versus Rivets*. 2015 [acedido em 19/03/2019]; Disponível em: <https://www.nord-lock.com/insights/knowledge/2015/the-comparison-bolts-versus-rivets/>.
22. Havel, G. *Construction Concerns: Structural Steel - Riveted Connections*. 2016 [acedido em 19/03/2019]; Disponível em: <https://www.fireengineering.com/articles/2016/01/structural-steel-riveted-connections.html>.
23. Hulimka, J. e Kałuža, M., *Preliminary Tests of Steel-to-steel Adhesive Joints*. Procedia Engineering, 2017. **172**: p. 385-392.
24. Silva, L.F.M., Magalhães, A.G. e Moura, M.F.S.F., *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
25. *Adesivos em engenhos mecânicos*. [acedido em 16/04/2019]; Disponível em: https://web.fe.up.pt/~proifeup/cd_2010_11/files/MMM509_relatorio.pdf.
26. He, X., *Clinching for sheet materials*. Science and Technology of Advanced Materials, 2017. **18**(1): p. 381-405.
27. Flodr, J., Kałduński, P., Krejsa, M. e Pařenica, P., *Innovative Connection of Steel Profiles, Experimental Verification and Application*. Procedia Engineering, 2017. **190**: p. 215-222.
28. Kachlík, P. e Klement, J., *Influence of ageing on rivet-bonded joint properties*. Aviation, 2005. **9**(2): p. 24-28.
29. da Silva, L.F.M., Pirondi, A. e Öchsner, A., *Hybrid adhesive joints*. Vol. 6. 2011, Berlim: Springer Science & Business Media.
30. Chatterjee, S., *The design of modern steel bridges*. 2008, Nova Jersey: John Wiley & Sons.
31. *Types of Bridges*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <http://www.historyofbridges.com/facts-about-bridges/types-of-bridges/>.
32. F.R., M. *Lusoponte não paga obras de fundo na 25 de Abril desde 2001*. 2018 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://sol.sapo.pt/artigo/603713/lusoponte-nao-paga-obras-de-fundo-na-25-de-abril-desde-2001>.
33. *Inspeção principal da Ponte Internacional sobre o rio Guadiana - Vila Real de St. António, Portugal*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://www.triede.pt/pt/obras/ponte-internacional-sobre-o-rio-guadiana>.
34. *Ponte Dona Maria Pia*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://www.feriasportugal.com/pt/post/ponte-dona-maria-pia>.
35. *Pont du Languedoc*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://structurae.net/structures/pont-du-languedoc>.
36. *Taylor-Southgate Bridge*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: <https://structurae.net/structures/taylor-southgate-bridge>.

37. *Cantilever*. 2019 [acedido em 06/03/2019]; Disponível em: <http://www.bridgesofdublin.ie/bridge-building/types/cantilever>.
38. *Cantilever Bridge*. 2019 [acedido em 06/03/2019]; Disponível em: <https://howbridgeswork.weebly.com/cantilever-bridge.html>.
39. *Box girder bridges*. 2019 [acedido em 28/02/2019]; Disponível em: https://www.steelconstruction.info/Box_girder_bridges.
40. Chen, Y., Dong, J. e Xu, T., *Composite box girder with corrugated steel webs and trusses – A new type of bridge structure*. Engineering Structures, 2018. **166**: p. 354-362.
41. CEN, *EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. 1995, European Committee for Standardization: Bruxelas.
42. CEN, *EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. 2005, European Committee for Standardization: Bruxelas.
43. CEN, *EN 1993-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 2: Steel bridges*. 2006, European Committee for Standardization: Bruxelas.
44. CEN, *EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*. 2005, European Committee for Standardization: Bruxelas.
45. CEN, *EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. 2004, European Committee for Standardization: Bruxelas.
46. *GSS15 Otimização em Engenharia*. 2019 [acedido em 12/03/2019]; Disponível em: <http://grids.web.ua.pt/index.php/events/past-events/gss15/>.
47. Christensen, P.W. e Klarbring, A., *An introduction to structural optimization*. Vol. 153. 2008, Berlim: Springer Science & Business Media.
48. *Tekla Structures - The Most Advanced BIM Software for Structural Workflow*. 2019 [acedido em 20/03/2019]; Disponível em: <https://www.tekla.com/products/tekla-structures>.
49. *CTeSP – Desenho e Modelação Digital*. [acedido em 20/03/2019]; Disponível em: <https://dep.estgv.ipv.pt/departamentos/dcivil/ctesp-desenho-e-modelacao-digital/>.
50. *Sobre o BIM*. 2015 [acedido em 20/03/2019]; Disponível em: <http://www.bimtec.pt/p7-sobre-o-bim-pt>.
51. Tagliani, S. *Softwares para engenharia: saiba quais são as vantagens do uso do AutoDesk Revit*. 2018 [acedido em 03/04/2019]; Disponível em: <https://engenharia360.com/softwares-para-engenharia-autodesk-revit/>.
52. *ArchiCAD*. 2019 [acedido em 03/04/2019]; Disponível em: <http://archicad.com/br/all-about-archicad/>.
53. Cardoso, A., Maia, B., Santos, D., Neves, J. e Martins, M., *BIM: O que é?* 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
54. Lino, J.C. *What is BIM (Building Information Modeling)?* 2012 [acedido em 20/03/2019]; Disponível em: <http://port.newton.pt/en/blog-engineering/20125/bim-building-information-modeling-engineering-projects.html>.
55. *Projeto de obra: A importância de um plano de trabalho!* 2018 [acedido em 21/03/2019]; Disponível em: <https://pipemasters.pt/blog/projetos/projeto-de-obra-importancia/>.

56. Ávila, P. e Cavaco, I., *Processo Conceito e Fundamentos*. 2009, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
57. Ahire, C.P. e Relkar, A.S., *Correlating Failure Mode Effect Analysis (FMEA) & Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. *Procedia Engineering*, 2012. **38**: p. 3482-3486.
58. *Importância do uso do método FMEA nas empresas*. 2016 [acedido em 21/03/2019]; Disponível em: <http://multisector.pt/2016/06/09/importancia-do-uso-do-metodo-fmea-nas-empresas/>.
59. IEC e ISO, *ISO 31010: Risk management - Risk assessment techniques*. 2009, International Electrotechnical Commission e International Organization for Standardization: Genebra.
60. Down, M., Brozowski, L., Younis, H., Benedict, D., Feghali, J., Schubert, M., Brender, R., Gruska, G., Vallance, G., Krasich, M. e Haughey, W., *Potential failure mode and effects analysis (FMEA)*. 2008, Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation: Michigan.
61. Moura, C., *Análise de modo e efeitos de falha potencial (FMEA)*. 2000, Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation: Michigan.
62. Santos, F. *A Estrutura Metálica em Portugal no ano 2017. E em 2027?* 2018 [acedido em 03/04/2019]; Disponível em: <http://www.construcaomagazine.pt/noticias/estrutura-metalica-em-Portugal/>.
63. Weman, K., *Welding processes handbook*. 2011, Cambridge Woodhead Publishing.
64. Santos, G., *Corte e outros processos de preparação de chanfros*. 2003, Instituto de Soldadura e Qualidade: Vila Nova de Gaia.
65. O'Brien, R.L., *Welding Handbook - Welding Processes*. 8 ed. Vol. 2. 1997, Miami: American Welding Society.
66. *Corte plasma*. 2019 [acedido em 02/05/2019]; Disponível em: <https://www.americaking.com.br/oquee.html>.
67. García, R.A.P. *Processos de soldadura por arco - Stud Welding*. 2016 [acedido em 02/05/2019]; Disponível em: <https://www.slideshare.net/RafaelPerezGarcia1/soldadura-de-pernos-por-arco-sw-stud-welding>.
68. Pereira, E.V. *Protecção de estruturas metálicas*. 2006 [acedido em 13/05/2019]; Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/EBAP/ExecucaoEstruturas/Elsa_IST_LNEC.pdf.
69. *Como seleccionar um sistema de pintura*. 2010 [acedido em 13/05/2019]; Disponível em: http://www.hempel.pt/pt-pt/~/_/media/858E3B4E62F34B5B99D7E114E9E065FB.pdf.
70. Tušar, T., Gantar, K., Koblar, V., Ženko, B. e Filipič, B., *A study of overfitting in optimization of a manufacturing quality control procedure*. *Applied Soft Computing*, 2017. **59**: p. 77-87.
71. IPQ, *NP EN ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos*. 2008, Instituto Português da Qualidade: Setúbal.
72. Luís, J.B., *Estruturas Metálicas - Execução e Controlo da Qualidade*. Instituto de Soldadura e Qualidade: Vila Nova Gaia.
73. *Controlo Dimensional*. 2015 [acedido em 27/03/2019]; Disponível em: <http://www.laserdynamics.pt/pt/controlo-dimENSIONAL>.

74. CEN, *EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures*. 2008, European Committee for Standardization: Bruxelas.
75. Fernandes, I., *Controlo da qualidade de juntas soldadas - Controlo da qualidade na produção*. 2007, Instituto de Soldadura e Qualidade: Vila Nova Gaia.
76. Fernandes, I., *Requisitos da qualidade na construção soldada*. 2007, Instituto de Soldadura e Qualidade: Vila Nova Gaia.
77. Fernandes, I., *Controlo da qualidade em juntas soldadas - Qualificação de procedimentos de soldadura*. 2007, Instituto de Soldadura e Qualidade: Vila Nova Gaia.
78. CEN, *prEN ISO 15607:2003 - Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - General rules*. 2003, European Committee for Standardization: Bruxelas.
79. Connor, L.P., *Welding Handbook - Welding Technology*. 8 ed. Vol. 1. 1997, Miami: American Welding Society.
80. *Qualificação de Soldadores e Procedimentos de Soldadura*. 2019 [acedido em; Disponível em: <https://www.tuv.com/portugal/pt/tecnologia-da-soldadura.html>].
81. Blodgett, O.W., Funderburk, R.S., Miller, D.K. e Quintana, M., *Fabricators' and Erectors' Guide to Welded Steel Construction*. 1999, Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
82. ISO, *ISO 12944-5:2007 - Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint system - Part 5: Protective paint systems*. 2007, International Organization for Standardization: Genebra.
83. Rodrigues, M.P., *Proteção de estruturas metálicas – Aço Revestimentos por pintura*. 2010, Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Lisboa.
84. *Serviços*. 2019 [acedido em 16/05/2019]; Disponível em: <https://www.metalizacaodealfena.pt/servicos/>.
85. ISO, *ISO 12944-4:1998 - Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint system - Part 4: Types of surface and surface preparation*. 1998, International Organization for Standardization: Genebra.
86. *Metal Blast Cleaning*. 2019 [acedido em 17/05/2019]; Disponível em: <http://www.apmblasting.co.uk/metal-blast-cleaning/>.
87. ISO, *ISO 12944-6:2018 - Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint system - Part 6: Laboratory performance test methods*. 2018, International Organization for Standardization: Genebra.
88. *Pintura*. 2014 [acedido em 17/05/2019]; Disponível em: <http://www.metalocar.pt/estruturas-metalicas-pintura>.
89. ISO, *ISO 4624:2002 - Paints and varnishes - Pull-off test for adhesion*. 2002, International Organization for Standardization: Genebra.
90. ISO, *ISO 2808:2007 - Paints and varnishes - Determination of film thickness*. 2007, International Organization for Standardization: Genebra.
91. Quatman, C. *Calculating and Measuring Wet Film Thickness*. 2017 [acedido em 16/05/2019]; Disponível em: <https://ktauniversity.com/calculating-wet-film-thickness-2/>.
92. Francis, R., *Dry Film Thickness Measurements: How Many Are Enough?* 2009, Aurecon: Docklands.

93. *Services - Coating Inspection & Testing*. 2015 [acedido em 17/05/2019]; Disponível em: <http://solentpc.co.uk/services/>.
94. *Powder Thickness Measurement*. 2019 [acedido em 16/05/2019]; Disponível em: <https://www.elcometer.com/en/coating-inspection/wet-film-powder-thickness/powder-thickness-measurement.html>.
95. *Powder Coating Thickness Measurement & Paperless QA*. 2019 [acedido em 16/05/2019]; Disponível em: <https://www.defelsko.com/resources/powder-coating-thickness-measurement-paperless-qa>.
96. Pinho, M.O., *Transporte e montagem*. 2005, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia.
97. Rodrigue, J.P. *Transportation Modes, Modal Competition and Modal Shift*. 2019 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: https://transportgeography.org/?page_id=1731.
98. *Transporte de contentores: Spinelli com 50 novos Actros 1845*. 2019 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: https://roadstars.mercedes-benz.com/pt_PT/magazine/transport/01-2015/spinelli-has-50-new-actros-1845.html.
99. Faulconbridge, G. *China inicia primeira viagem de trem de carga para Londres, diz Xinhua*. 2017 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/reuters/2017/01/03/china-inicia-primeira-viagem-de-trem-de-carga-para-londres-diz-xinhua.htm>.
100. *Transporte aéreo é eficaz na exportação de mercadorias*. 2014 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: <https://www.tibagroup.com/pt/transporte-aereo-e-eficaz-na-exportacao-de-mercadorias>.
101. Freelers. *Transporte aéreo de carga sobe 12,1% em agosto, aponta lata*. 2017 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: <https://www.frotacia.com.br/transporte-aereo-de-carga-sobe-12-1-em-agosto-aponta-iata/>.
102. *Maritime transport*. 2019 [acedido em 23/04/2019]; Disponível em: <http://www.iberteam.es/index.php/maritime-transport?lang=en>.
103. Brockenbrough, R.L. e Merritt, F.S., *Structural steel designer's handbook*. 3 ed. 1999, Nova Iorque: McGraw-Hill.
104. *Activities and Services - Bridges*. 2019 [acedido em 02/05/2019]; Disponível em: <http://en.vsl.cz/bridges/>.
105. *Engineering excellence in bridge construction and heavy lifting*. 2019 [acedido em 02/05/2019]; Disponível em: <http://www.bbrnetwork.com/technologies/construction-methods.html>.
106. *Metalongo*. 2019 [acedido em 18/06/2019]; Disponível em: <http://metalongo.com/>.
107. Kozak, J. e Kowalski, J., *Problems of determination of welding angular distortions of T-fillet joints in ship hull structures*. 2015. **22**(2): p. 79-85.
108. IPQ, *NP EN ISO 15614-1:2005 -Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura para materiais metálicos. Prova de procedimentos de soldadura. Parte 1: Soldadura por arco e gás de aços e soldadura por arco de níqueis e suas ligas*. 2005, Instituto Português da Qualidade: Setúbal.
109. ISO, *ISO 14555:2006 - Welding - Arc stud welding of metallic materials*. 2006, International Organization for Standardization: Genebra.

110. *Planeamento e infraestruturas*. 2017, Diário da República: Lisboa.

ANEXOS

- 6.1 ANEXO 1 – Plano de trabalhos
- 6.2 ANEXO 2 – Desenhos do cliente
- 6.3 ANEXO 3 – Desenhos de fabrico
- 6.4 ANEXO 4 - Folha de gama operatória
- 6.5 ANEXO 5 - Folha de operação
- 6.6 ANEXO 6 - Plano de inspeção e ensaios
- 6.7 ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade
- 6.8 ANEXO 8 - Lista de expedição de conjuntos, peças e equipamentos

6 ANEXOS

6.1 ANEXO 1 – Plano de trabalhos

6.2 ANEXO 2 – Desenhos do cliente

6.3 ANEXO 3 – Desenhos de fabrico

6.4 ANEXO 4 – Folha de gama operatória

6.5 ANEXO 5 – Folhas de operação

- Lista de corte

- Folhas CNC

- Lista de peças por conjunto

- WPS da empresa

- WPS propostas

- WPQR

- Esquemas de pintura

6.6 ANEXO 6 – Plano de inspeção e ensaios

6.7 ANEXO 7 - Relatórios dos ensaios de qualidade

6.8 ANEXO 8 – Listas de expedição de conjuntos, peças e equipamentos